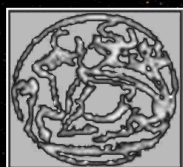
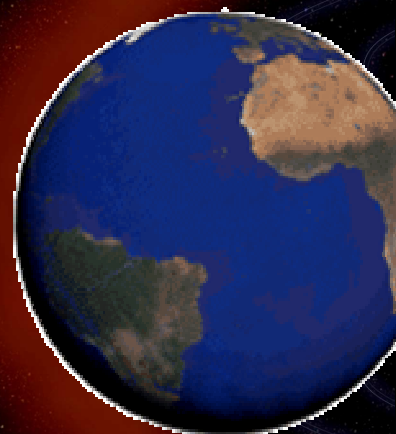
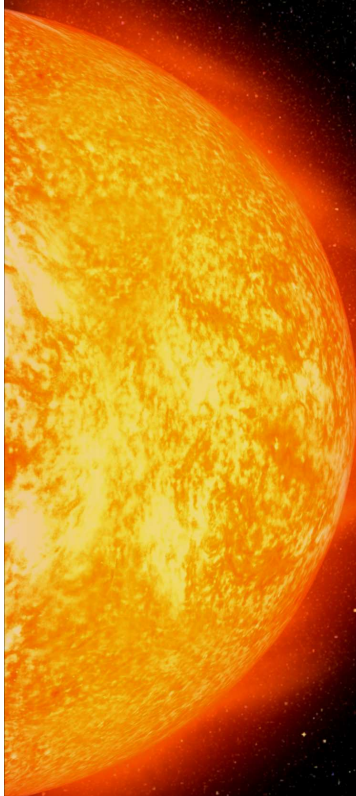
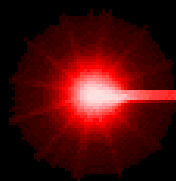


# Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός μέσω της ακτίνας ενός διοδικού laser

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΟΔΕΥΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ



Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ / ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ / ΜΑΡΤΙΟΣ 2006

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ :

ΑΘΗΝΑΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. ΤΑΤΑΡΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΒΟΗΘΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗ : Δρ. ΠΕΤΡΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ



# ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ / ΜΑΡΤΙΟΣ 2006

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ / ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ : **ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΑΘΗΝΑΙΟΣ**  
ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ ΘΕΜΑΤΟΣ : **ΔΡ. ΤΑΤΑΡΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ**  
ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ : **ΔΡ. ΠΕΤΡΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

## ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΚΤΙΝΑΣ ΔΙΟΔΙΚΟΥ LASER

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρόλο που η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μια από τις πιο σημαντικές σταθερές, σπάνια γίνεται ο απευθείας υπολογισμός της σε ένα προπτυχιακό εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικής. Συσκευές που μετρούν κατευθείαν την ταχύτητα του φωτός είναι εμπορικά διαθέσιμες. Αυτές βασίζονται στην διαμόρφωση (modulation) της ακτινοβολίας που παράγει ένα LED ή ένα διοδικό laser.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός απλού και χαμηλού κόστους (πρωτοτυπία της κατασκευής αυτής) οπτοηλεκτρονικού συστήματος για την μέτρηση της ταχύτητας του φωτός βασισμένο στην τεχνική 'Time of Flight'. Η αρχή της τεχνικής αυτής βασίζεται στον χρόνο που κάνει να διανύσει ένας παλμός laser μια γνωστή απόσταση. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν και η απόκτηση εμπειρίας και γνώσης στην / στις α) ευθυγράμμιση οπτικών διατάξεων, β) στην κατασκευή και χαρακτηρισμό διατάξεων laser και φωτοδιόδων, γ) στις τεχνικές μέτρησης μικρών χρόνων και δ) στην εξοικείωση με μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων, εκτίμησης και ανάλυσης αποτελεσμάτων.



# TECHNOLOGICAL EDUCATIONAL INSTITUTION OF CRETE

## DEPARTMENT OF ELECTRONICS

CHANIA, CRETE, GREECE, MARCH 2006

ASSIDUITY/PRESENTATION: **NICHOLAS ATHINEOS**  
RAPPORTEUR OF WORK: **DR. TATARAKIS M. & DR. PETRIDIS K.**

SUBJECT OF DIPLOMA WORK:

# MEASUREMENT OF SPEED OF LIGHT USING A BEAM L.A.S.E.R.

## ABSTRACT

Even if the speed of light in the void is one from the most important constants, infrequent becomes her direct calculation in a second cycle laboratory of OPTICAL ELECTRONICS.

Appliances that measure straight the speed of light are commercial available. They are based on the configuration (modulation) the radiation that produces a LED or a LASER.

Aim of this final work is the designing and manufacture a simple and low cost (originality of this manufacture) optical-electronic system for the measurement of speed of light based on the technical 'Time of Flight'. The beginning of this technique is based on the time that it makes cover a vibration laser a known distance.

Aim of this work was also the acquisition of experience and knowledge in the a) alignment of optical provisions, b) in the manufacture and characterization of provisions laser and photodiodes, c) in the techniques of measurement of short timings and d) in the familiarization with methods of treatment of data, estimate and analysis of results.

# Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός μέσω της ακτίνας ενός διοδικού laser

## Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

|     |                             |          |
|-----|-----------------------------|----------|
| 1.1 | Ιστορική αναδρομή του LASER | σελίδα 1 |
| 1.2 | Σκοπός της εργασίας         | » 4      |
| 1.3 | Αναφορές                    | » 7      |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β : SEMICONDUCTOR LASER & ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΙ

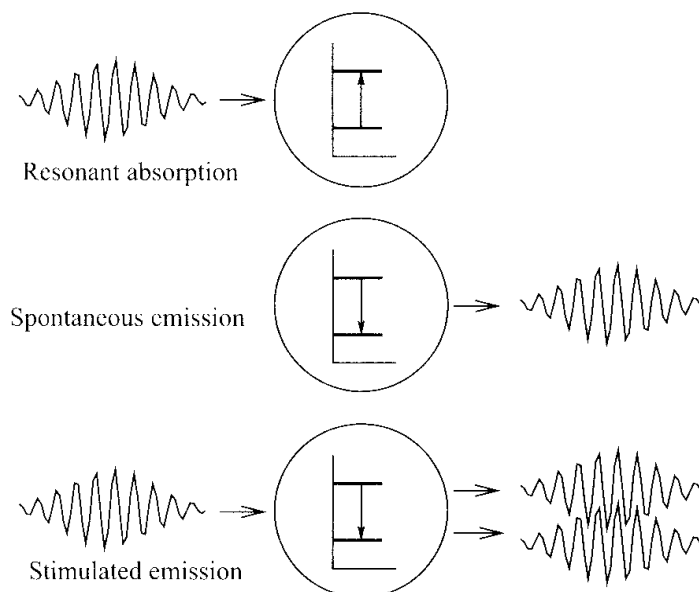
|     |                     |          |
|-----|---------------------|----------|
| 2.1 | LASER ημιαγωγών     | σελίδα 8 |
| 2.2 | Η φωτοδίοδος        | » 26     |
| 2.3 | Σχήματα Διαμόρφωσης | » 31     |
| 2.4 | Αναφορές            | » 37     |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

|     |                                      |           |
|-----|--------------------------------------|-----------|
| 3.1 | Πειραματική διάταξη                  | σελίδα 38 |
| 3.2 | Διοδικό LASER                        | » 39      |
| 3.3 | Ανιχνευτές φωτός – Φωτοδίοδοι        | » 41      |
| 3.4 | Παλμογράφος και Γεννήτρια συχνοτήτων | » 42      |
| 3.5 | Πειραματική διαδικασία               | » 42      |
| 3.6 | Μελλοντική βελτίωση                  | » 45      |
| 3.7 | Βιβλιογραφία                         | » 46      |

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή του LASER

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να αλληλεπιδράσει με την ύλη μέσω τριών βασικών διεργασιών: α) της απορρόφησης, β) της αυθόρμητης εκπομπής και γ) της εξαναγκασμένης εκπομπής. Οι διεργασίες αυτές απεικονίζονται στο σχήμα 1.1 για ένα ατομικό σύστημα δύο ενεργειακών επιπέδων.

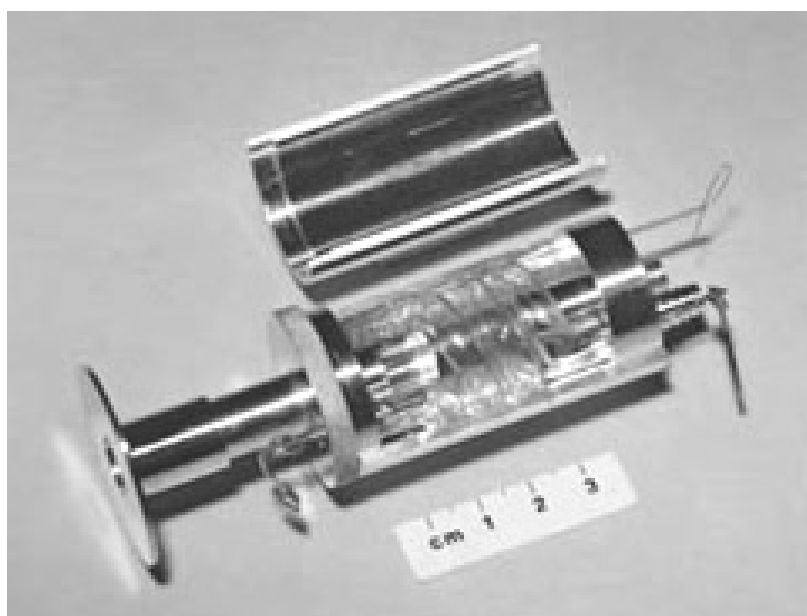


**Σχήμα 1.1:** Οι τρεις βασικές διεργασίες αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη. α) Απορρόφηση (absorption), β) Αυθόρμητη εκπομπή (Spontaneous emission) και γ) Εξαναγκασμένη εκπομπή (Stimulated emission) [1]

Ο μηχανισμός της εξαναγκασμένης εκπομπής, ο οποίος ερμηνεύθηκε το 1916 από τον Albert Einstein, **αποτελεί την «αρχή λειτουργίας»** της συσκευής που ονομάζεται LASER.

Η ονομασία LASER είναι το ακρωνύμιο των λέξεων **L**ight **A**mplification of **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Ενίσχυση φωτός από εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας). Το LASER ως ιδέα εισήλθε στην επιστημονική κοινότητα από τους Shawlow και Townes το 1958 [2]. Οι δυο αυτοί επιστήμονες βραβεύθηκαν με το Nobel φυσικής το 1981 (στην φασματοσκοπία με laser) και 1964 (στην συνεισφορά στην τεχνολογία maser και laser) αντίστοιχα.

Η 1<sup>η</sup> συσκευή laser, είχε ως ενεργό υλικό Ρουβίδιο (στερεό), κατασκευάστηκε από τον H. Maiman το 1960. Η συσκευή αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 1.2. Ο Maiman το 1984 έλαβε το Nobel Φυσικής και την ίδια χρονιά έγινε μέλος του National Inventors Hall of Fame. Τρία χρόνια αργότερα έλαβε το αντίστοιχο βραβείο Nobel Ασίας το Japan Prize. Κατά την διάρκεια της απονομής του Nobel φυσική δήλωσε ότι οφείλει την επιτυχία του στο ακαδημαϊκό background που απέκόμισε κατά την διάρκεια των προπτυχιακών (Ηλεκτρονικός) και των μεταπτυχιακών σπουδών του (Msc στην οπτική).



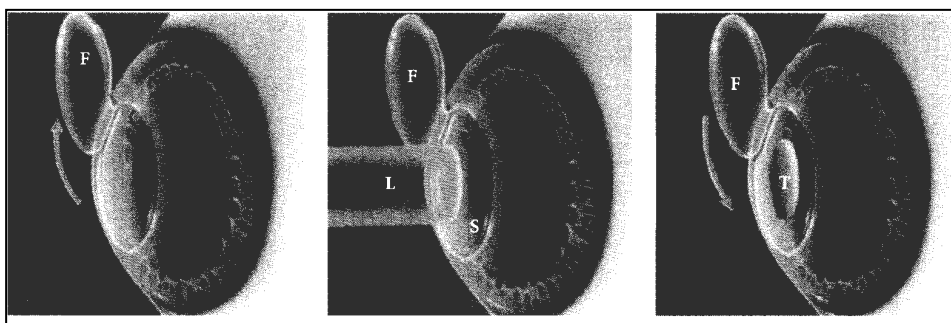
**Σχήμα 1.2:** Η 1<sup>η</sup> συσκευή laser (Laser ρουβιδίου) [1]

Η ακτινοβολία laser έχει μοναδικές ιδιότητες (μονοχρωματικότητα, κατευθυντικότητα, συμφωνία φάσης και υψηλή ένταση) στις οποίες οφείλει τον μεγάλο αριθμό εφαρμογών που έχει.

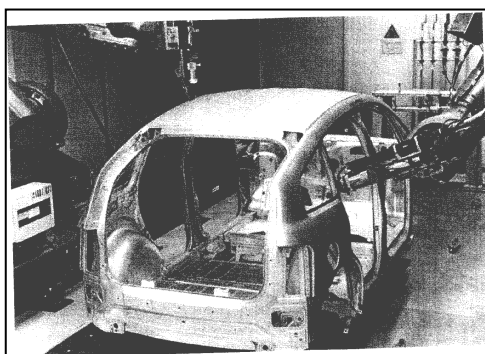
Το LASER έχει ταυτιστεί με τις έννοιες τα ακρίβειας, ποιότητας και ταχύτητας. Η ανακάλυψη του LASER θεωρείται μια από τις δέκα κορυφαίες ανακαλύψεις του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Μέχρι τα τέλη του 1980 πολλά συστήματα laser έμεναν «κρυμμένα» μέσα στα ερευνητικά εργαστήρια και τις στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Την περίοδο εκείνη άρχισαν οι συσκευές laser να βρίσκουν εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή.

Σήμερα τα lasers έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στην ιατρική (χειρουργικό νυστέρι, στην οφθαλμιατρική, στην οδοντιατρική, στην δερματολογία, στην ογκολογία), στην βιομηχανία (κοπή και συγκόλληση μετάλλων, αυτοκινητοβιομηχανία), στην διασκέδαση (DVD, CD), στον στρατό (αποστασιόμετρα, πλοήγηση, κατευθυντικότητα οπλικών συστημάτων), στην έρευνα (φασματοσκοπία, σύντηξη, συμβολομετρία, φωτοβιολογία), στην τέχνη (συντήρηση έργων τέχνης) και άλλου. Μερικές από τις εφαρμογές των LASERs απεικονίζονται στο σχήμα 1.3 [3].

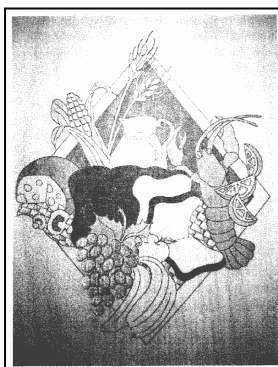
Πάνω από ένα δισεκατομμύριο συσκευές laser βρίσκονται σε χρήση σήμερα. Το μέγεθος τους ποικίλει από πολύ μικρών διαστάσεων συσκευές μέχρι και συσκευές που έχουν τις διαστάσεις δωματίου. Ανεξάρτητα από την ισχύ της ακτινοβολίας που μπορούν να παράγουν, τις διαστάσεις τους και το ενεργό μέσο που χρησιμοποιούν η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στη αρχή λειτουργία που περιγράφουν οι Shawlow και Townes στην εργασία τους [2].



Εφαρμογή των Lasers στην οφθαλμολογία : LASIK



Εφαρμογή των lasers στην αυτοκινητοβιομηχανία



Χάραξη με laser σε ξύλινη επιφάνεια



Εφαρμογή των lasers στην συντήρηση έργων τέχνης

**Σχήμα 1.3: Εφαρμογές των lasers [3]**

## 1.2 Σκοπός της εργασίας

Παρόλο που η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μια από τις πιο σημαντικές σταθερές, σπάνια γίνεται ο απευθείας υπολογισμός της σε ένα προπτυχιακό εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικής. Συσκευές που μετρούν κατευθείαν την ταχύτητα του φωτός είναι εμπορικά διαθέσιμες. Αυτές βασίζονται στην διαμόρφωση (modulation) της ακτινοβολίας που παράγει ένα LED ή ένα διοδικό laser.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός απλού και χαμηλού κόστους (πρωτοτυπία της κατασκευής αυτής) οπτοηλεκτρονικού συστήματος για την μέτρηση της ταχύτητας του φωτός βασισμένο στην τεχνική 'Time of Flight'. Η αρχή της τεχνικής αυτής βασίζεται στον χρόνο που κάνει να διανύσει ένας παλμός laser μια γνωστή απόσταση. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν και η απόκτηση εμπειρίας και γνώσης στην / στις α) ευθυγράμμιση οπτικών διατάξεων, β) στην κατασκευή και χαρακτηρισμό διατάξεων laser και φωτοδιόδων, γ) στις τεχνικές μέτρησης μικρών χρόνων και δ) στην εξοικείωση με μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων, εκτίμησης και ανάλυσης αποτελεσμάτων.

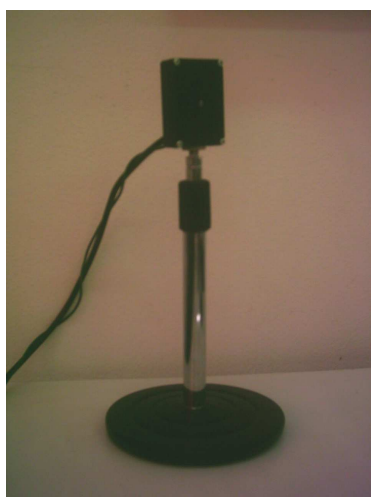


**Σχήμα 1.4:** οπτοηλεκτρονικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ταχύτητας του φωτός

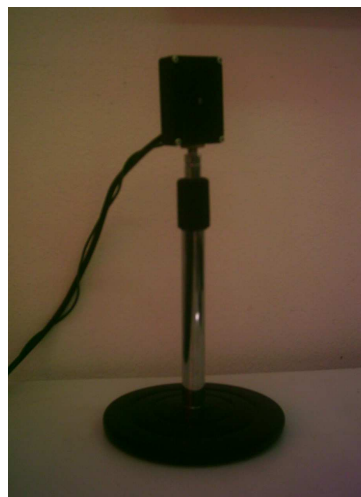
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εργασίας αυτής είναι τα παρακάτω:



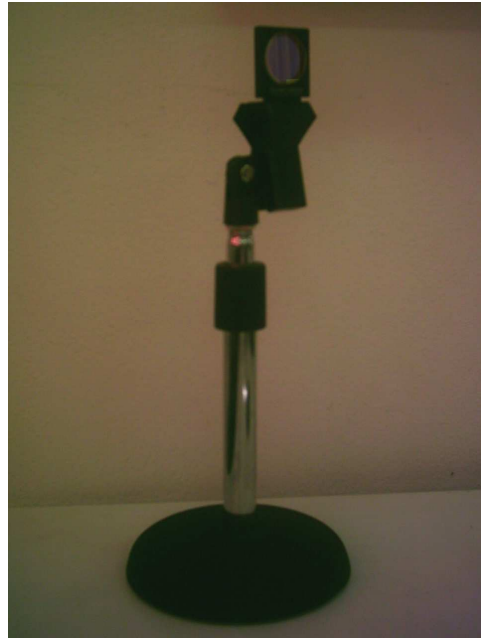
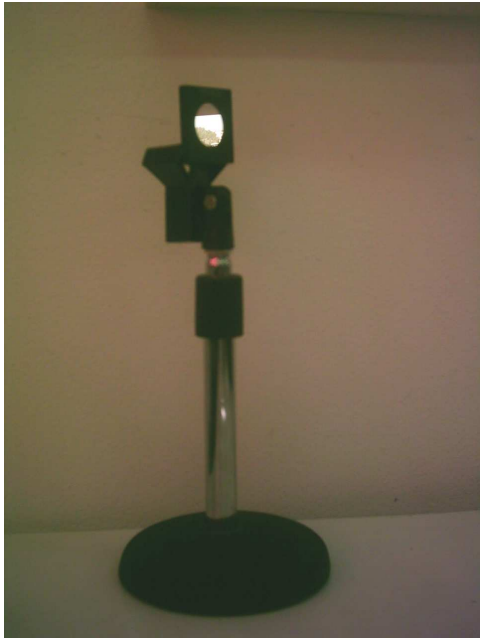
1. **Διοδικό laser** (μήκος κύματος  $\lambda = 680 \text{ nm}$ ,  $P_{\text{out}} = 1 \text{ mW}$ ) το οποίο προσαρμόσθηκε σε μεταλλικό σωλήνα ώστε να μπορέσει να στηριχθεί και να στρέφεται κατ' επιλογήν μας για την σωστή εκτέλεση της εργασίας.



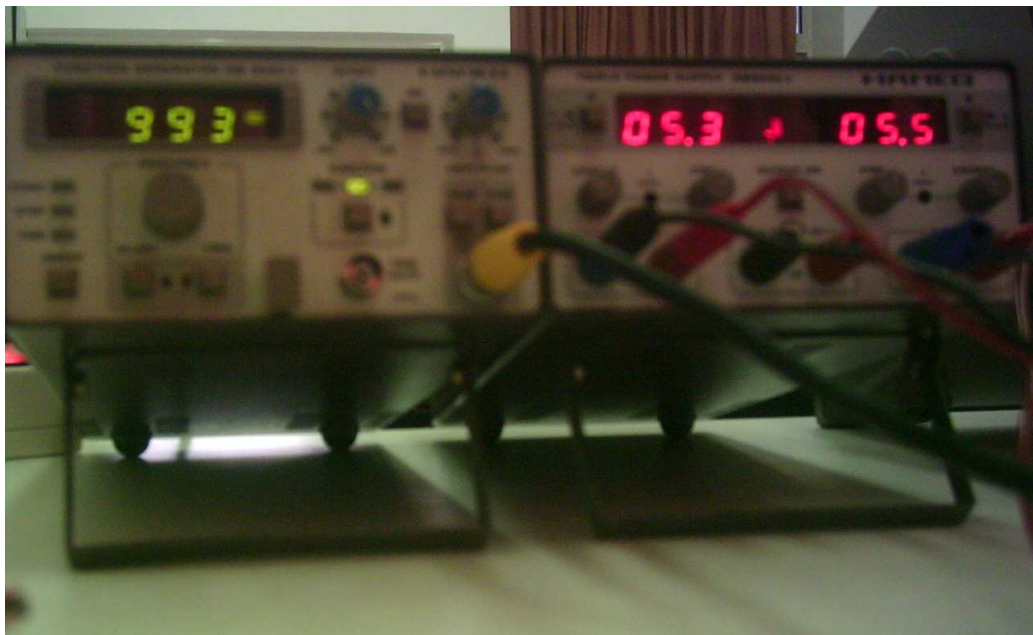
**BPW 34**



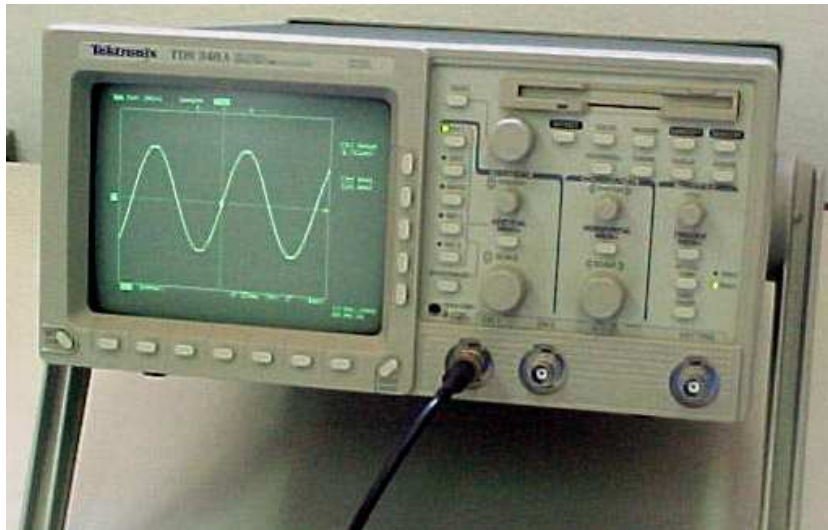
2. **Δύο φωτοδίοδοι** ( BPW34 ) οι οποίες συνοδευόντουσαν από τα αντίστοιχα κυκλώματα τους σε πλακέτες και προσαρμοσμένες εντός πλαστικών κουτιών σε βάσεις για την καλύτερη και ευκολότερη τοποθέτηση έναντι της ακτίνας LASER.



3. Ημιπερατό και πλήρως ανακλαστικό κάτοπτρο



4. Γεννήτρια συχνοτήτων & τροφοδοτικό



## 5. Παλμογράφος

### 1.3 Αναφορές

- [1] Σημειώσεις μαθήματος 'Τεχνολογία των lasers', Δρ. Κ.Πετρίδης, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Τεχνολογικό Ίδρυμα Κρήτης
- [2] 'Infrared and Optical Masers', A.L. Schawlow, C.H. Townes, Physical Review, Vol. 112, Number 6, pp. 1940 – 1949
- [3] Laser Processing of engineering materials, J.C. Ion
- [4] Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός με την βοήθεια ενός laser pointer, Δρ Ι.Α. Σιανούδης

## 2.1 Lasers Ημιαγωγών



**Σχήμα 2.1:** Συσκευή diode laser [1]

Το πρώτο ημιαγωγικό laser κατασκευάστηκε το 1961 από τον Robert Hall. Το 1<sup>ο</sup> διοδικό laser που λειτούργησε σε CW λειτουργία κατασκευάστηκε το 1975.

Τα laser ημιαγωγών (semiconductor laser) είναι τα πιο σπουδαία laser σε χρήση σήμερα. Έχουν πολλές εφαρμογές, μεταξύ των οποίων είναι οι οπτικές τηλεπικοινωνίες, τα cd players, τα barcode scanners, οι laser printers και η άντληση άλλων συστημάτων laser στερεάς κατάστασης. Η σπουδαιότητά τους επίσης αποδεικνύεται από το ότι είναι πρώτα σε πωλήσεις laser αυτή την στιγμή στον κόσμο.

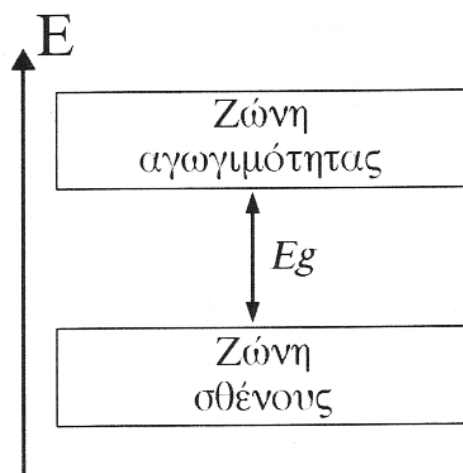
Τα κύρια χαρακτηριστικά των laser ημιαγωγών είναι τα παρακάτω

- Είναι αποδοτικά (~30-50%)
- Συμπαγή (~ 1mm διαστάσεις) και εύκολα στην χρήση
- Αντλούνται ηλεκτρικά (χρειάζονται μερικά volts τάση και μερικά mA ρεύμα)
- Η ενεργός διατομή κέρδους είναι μεγάλη

- Ευρύ φάσμα εκπομπής ( $\sim 10 \text{ nm}$ )
- Εκπομπή από  $390 \text{ nm} - 1.3 \mu\text{m}$
- 4 επιπέδων laser
- Τεχνολογικά αναπτυσσόμενα lasers

Οι ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται από υψηλής κανονικότητας κρυστάλλους ατόμων ή ιόντων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ζωνών ενεργειακών καταστάσεων. Ανάμεσα σε αυτές τις ζώνες υπάρχουν απαγορευμένες ενεργειακές καταστάσεις οι οποίες είναι γνωστές σαν **ενεργειακά χάσματα**. Στο πυρίτιο το ενεργειακό χάσμα είναι της τάξεως του  $1.1 \text{ eV}$ . Οι ενεργειακές καταστάσεις μέσα στις ζώνες είναι πυκνό – κατοικημένες.

Η ζώνη με την χαμηλότερη ενέργεια (που αντιστοιχεί στα δέσμια ηλεκτρόνια) ονομάζεται **ζώνη σθένους**. Η επόμενη ενεργειακή ζώνη καλείται **ζώνη αγωγιμότητας** και αντιστοιχεί στα ελεύθερα ηλεκτρόνια.



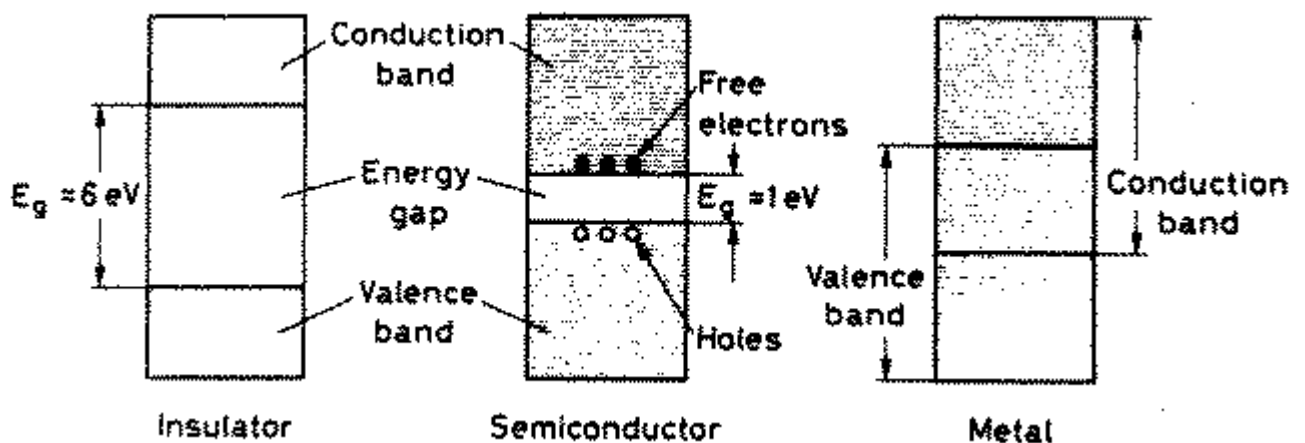
**Σχήμα 2.2:** Ζώνες Σθένους & Αγωγιμότητας [2]

Σε κάθε ενεργειακή κατάσταση μπορούν να βρίσκονται σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli μονάχα 2 ηλεκτρόνια με αντίθετο spin. Τα ηλεκτρόνια υπακούουν στην απαγορευτική αρχή των Fermi-Dirac που δίνει την πιθανότητα το ηλεκτρόνιο να βρίσκεται στην ενεργειακή στάθμη  $E$

$$f(E) = \left[ 1 + \exp \left[ \frac{(E - E_F)}{kT} \right] \right]^{-1} \quad (2.1)$$

Όπου  $E_F$  είναι η ενέργεια Fermi για την οποία, στους μηδέν βαθμούς Kelvin οι ενεργειακές καταστάσεις χαμηλότερες από αυτήν είναι πλήρως κατοικημένες και βρίσκονται στην ζώνη σθένους ενώ οι υψηλότερες από αυτή είναι τελείως άδειες και βρίσκονται στην ζώνη αγωγιμότητας. Η ενέργεια Fermi εκφράζει το σύνορο μεταξύ των κατειλημμένων και των κενών ενεργειακών σταθμών και στους  $0^\circ\text{K}$  βρίσκεται στην μέση του ενεργειακού χάσματος. Βλέπουμε στο σχήμα 2.3 ότι η πιθανότητα να βρίσκεται ένα ηλεκτρόνιο στην ζώνη αγωγιμότητας στους  $0^\circ\text{K}$  είναι μηδέν ενώ να βρίσκεται στην ζώνη σθένους είναι ένα. Πράγμα που συμφωνεί και με τον ορισμό της ενέργειας Fermi στους μηδέν βαθμούς Kelvin.

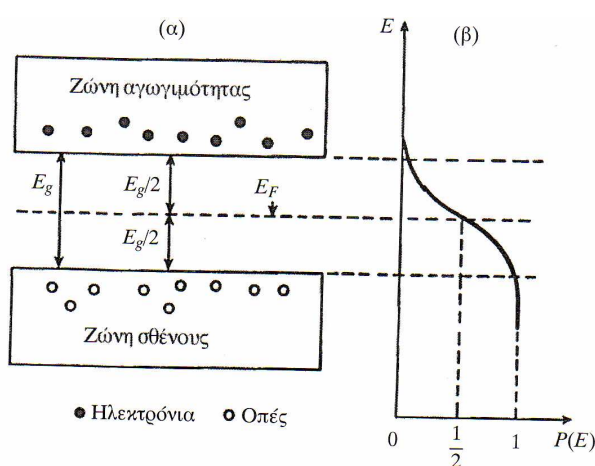
Τα άτομα στους ημιαγωγούς έχουν άρτιο αριθμό ηλεκτρονίων, ο ατομικός τους δηλαδή αριθμός είναι άρτιος αριθμός. Στους αγωγούς ο ατομικός αριθμός είναι περιττός. Ένας μονωτής προκύπτει εάν το ενεργειακό χάσμα μεταξύ 2 ενεργειακών ζωνών είναι περίπου ίσο με 6 eV (βλέπε σχήμα 2.2)



**Σχήμα 2.2:** Κατηγοριοποίηση στερεών με βάση το ενεργειακό τους χάσμα [3]

Όταν ένα δέσμιο ηλεκτρόνιο αφήνει την ζώνη σθένους και διεγείρεται στην ζώνη αγωγιμότητας τότε αφήνει πίσω του μια κενή θέση που ονομάζεται **οπή**. Η τελευταία μπορεί να κινηθεί μέσα στην ζώνη σθένους και να συνεισφέρει στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Η οπή μπορεί επανασυνδεθεί με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και με αυτό τον τρόπο να επαναδημιουργηθεί ένα ηλεκτρόνιο σθένους.

Στην θερμοκρασία δωματίου (300 °K) μερικά από τα ηλεκτρόνια σθένους μεταπηδούν στην ζώνη αγωγιμότητας. Αφήνοντας πίσω τους κενές θέσεις, τις οπές.



**Σχήμα 2.3:** Κατανομή Ηλεκτρονίων σε θερμοκρασία μηδέν Kelvin [2]

Στην θερμοκρασία δωματίου (300 °K) μερικά από τα ηλεκτρόνια σθένους μεταπηδούν στην ζώνη αγωγιμότητας. Αφήνοντας πίσω τους κενές θέσεις, τις οπές.

Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές στην ζώνη σθένους ονομάζονται φορείς του ρεύματος και κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις στην περίπτωση εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα του ημιαγωγού.

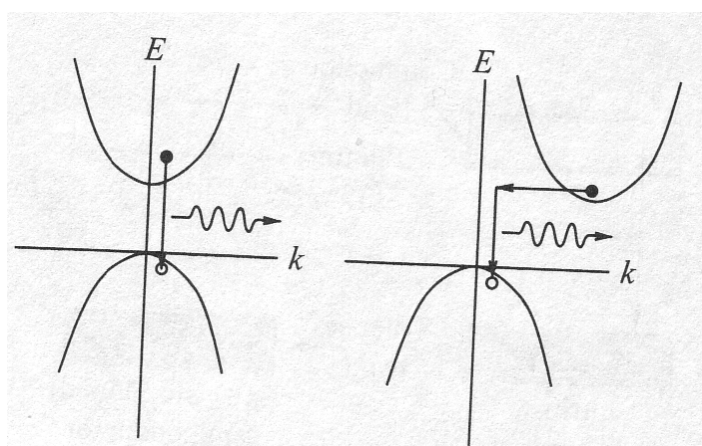
Ηλεκτρόνια μπορούν επίσης να διεγερθούν από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας με την απορρόφηση ενός φωτονίου κατάλληλης ενέργειας. Αυτή είναι βασική αρχή λειτουργίας των photoconductors. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια ανιχνεύονται με την μετρούμενη αύξηση της αγωγιμότητας του ημιαγωγού.

Στο ενεργειακό μοντέλο των ζωνών στους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια ενέργειας  $E$  κινούνται μέσα στο κρύσταλλο έχοντας ένα κυματάνυσμα  $k$ . Το κυματάνυσμα αυτό καθορίζει την ενέργεια και την ορμή του ηλεκτρονίου σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad (2.2)$$

$$p = \hbar k$$

Όπου  $m^*$  είναι η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου. Η μορφή της γραφικής αναπαράστασης της (2.2) που περιγράφει την σχέση ανάμεσα στην ενέργεια  $E$  του ηλεκτρονίου και του κυματάνυσματος είναι μια παραβολή. Οι ημιαγωγοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν (α) σε αυτούς που έχουν ευθύ χάσμα και (β) σε αυτούς που έχουν μη ευθύ χάσμα.



**Σχήμα 2.4:** Ευθέος και μη ευθέος ενεργειακού χάσματος ημιαγωγοί [4]

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα στου ευθέος χάσματος ημιαγωγό η ελάχιστη ενέργεια της ζώνης αγωγιμότητας και η μέγιστη ενέργεια της ζώνης σθένους χαρακτηρίζεται από το ίδιο κυματάνυσμα. Αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση του μη ευθέος χάσματος ημιαγωγό.

Για να συμβούν οι ακτινοβολούσες μεταβάσεις στους μη ευθείς ημιαγωγούς χρειάζεται η μηχανική αλληλεπίδραση τους με τον κρύσταλλο. Αυτή η αλληλεπίδραση γίνεται με την μορφή της εκπομπής φωνονίου. Οι ημιαγωγοί ευθέους χάσματος θεωρούνται πιο αποδοτικές πηγές ακτινοβολίας από τους

μη ευθέως χάσματος ημιαγωγούς. Παραδείγματα ευθέως χάσματος ημιαγωγού είναι το GaAs ενώ μη ευθέως χάσματος είναι αυτός του πυριτίου.

Όταν ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας μεταπέσει από την ζώνη αγωγιμότητας στην ζώνη σθένους τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο με την ταυτόχρονη επανασύνδεση ενός ηλεκτρονίου με μια οπή.

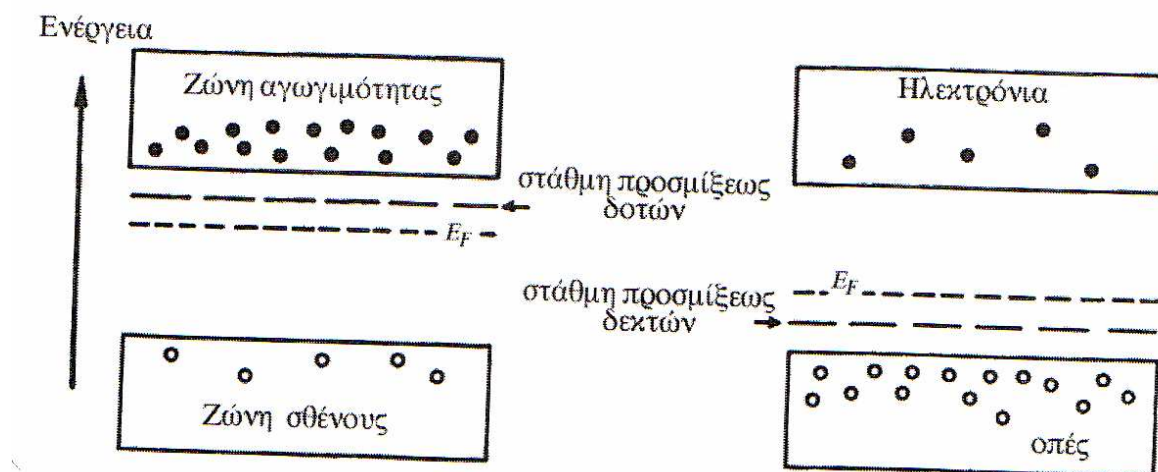
Δράση laser προκαλείται όταν δημιουργηθεί αναστροφή πληθυσμού μεταξύ του κάτω μέρους της ζώνης αγωγιμότητας και του πάνω μέρους της ζώνης σθένους. Για να δημιουργηθεί αναστροφή πληθυσμού θα πρέπει να διεγερθεί ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας.

Ένας ημιαγωγός ονομάζεται **ενδογενής** όταν έχει ίσο αριθμό ηλεκτρονίων και οπών. Αντίθετα όταν ο αριθμός των οπών με τα ηλεκτρόνια είναι άνισος ο ημιαγωγός λέγεται ότι είναι **εξωγενής**. Η δεύτερη περίπτωση πετυχαίνεται με τον εμπλουτισμό του ημιαγωγού με προσμίξεις (σε ποσοστό περίπου ίσο με 1%), δηλαδή την τοποθέτηση ενός 'ξένου' ιόντος στο κρυσταλλικό πλέγμα του ημιαγωγικού υλικού.

Ένας ημιαγωγός ονομάζεται **n-ημιαγωγός** όταν το άτομο της ξένης ουσίας έχει ένα πλεονάζον ηλεκτρόνιο (πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα). Το ηλεκτρόνιο αυτό δεν χρησιμοποιείται στους ομοιοπολικούς δεσμούς του πλέγματος και κινείται εύκολα. Το άτομο της πρόσμιξης ονομάζεται άτομο δότης και μετατρέπεται σε θετικό ιόν. Σε θερμοκρασία δωματίου τα περισσότερα από τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια βρίσκονται στην ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα πλεόνασμα αρνητικών φορτισμένων φορέων. Η ενέργεια Fermi μετατοπίζεται προς την ζώνη αγωγιμότητας.

Ένας ημιαγωγός είναι p – τύπου όταν το άτομο της πρόσμιξης έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο από αυτά που έχουν στους ομοιοπολικούς δεσμούς τα άτομα του πλέγματος. Εύκολα δέχεται ηλεκτρόνια που εξαγονται από την ζώνη σθένους των ατόμων του ενδογενή ημιαγωγού. Το άτομο δέκτης, αυτό δηλαδή της ξένης ουσίας, μετατρέπεται σε αρνητικό ιόν. Σε θερμοκρασία δωματίου η πλειονότητα των κενών θέσεων των δεκτών γεμίζει από

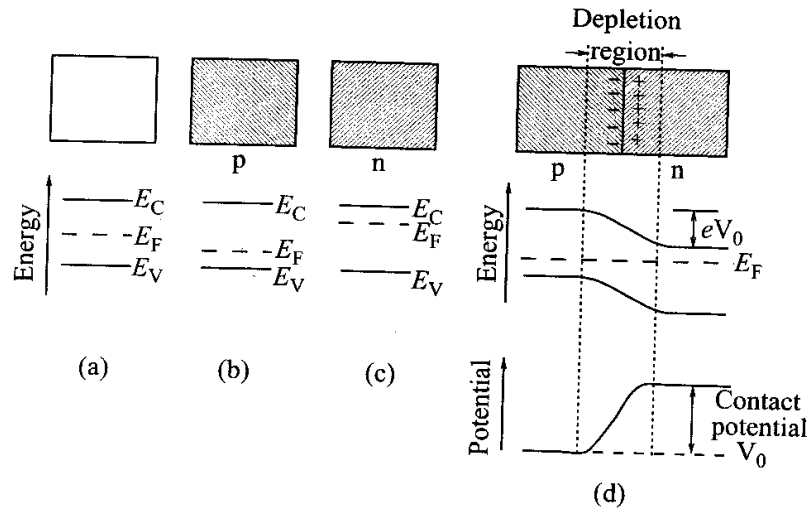
ηλεκτρόνια που εξάγονται από την ζώνη σθένους του ημιαγωγού. Η ενέργεια Fermi στην περίπτωση αυτή μετατοπίζεται προς την ζώνη σθένους.



**Σχήμα 2.5:** Εξωγενής Ημιαγωγοί [2]

Μια δίοδος ημιαγωγού είναι μια ένωση ενός  $n$  – ημιαγωγού με ένα  $p$  – ημιαγωγό. Όταν γίνει αυτή η ένωση έχουμε διάχυση ( $e$ ) προς την περιοχή  $p$  και την ίδια στιγμή κίνηση οπών από την  $p$  περιοχή προς την  $n$  για να επανασυνδεθούν με τα ηλεκτρόνια. Αυτό έχει σαν συνέπεια η επαφή των 2 ημιαγωγών να 'απογυμνώνεται' από φορείς και για αυτό το λόγο ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης. Απουσία εξωτερικού πεδίου στην περιοχή της επαφής των 2 ημιαγωγών παραμένουν μονάχα τα σταθερά θετικά ιόντα των δοτών (περιοχή  $n$ ) και τα αρνητικά ιόντα των δεκτών στην  $p$  πλευρά. Λόγω της παρουσίας των θετικών (δότες) και αρνητικών ιόντων (δέκτες) δημιουργείται ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή που εμποδίζει την περαιτέρω κίνηση των φορέων. Διατηρώντας έτσι την περιοχή απογύμνωσης άδεια από κινούμενα φορτία και περιορισμένη σε μια στενή περιοχή.

Το πώς δημιουργείτε μια  $p$  –  $n$  επαφή εικονίζεται στα παρακάτω διαγράμματα

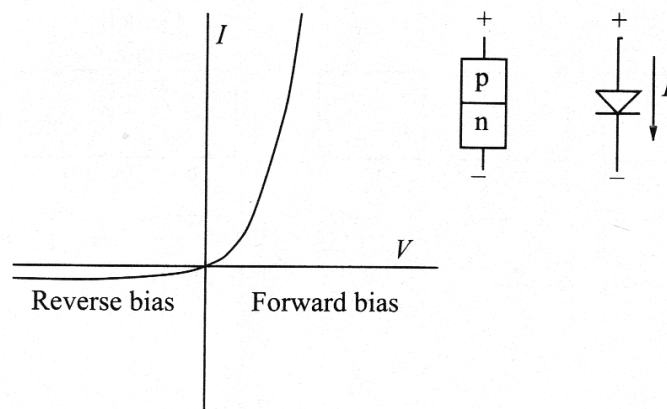


**Σχήμα 2.6 : P-N επαφή [5]**

Η κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων προς την επαφή και των οπών επίσης υπάρχει μέχρι την στιγμή όπου η ενέργεια Fermi γίνει ίση και στις 2 πλευρές. Η τάση στα άκρα της επαφής παίρνει την τιμή ίση με  $V_0$  και ονομάζεται τάση φράγματος δυναμικού.

Εάν εφαρμόσουμε μια ορθή πόλωση, δηλαδή ο θετικός πόλος της πηγής ενωθεί με το p ημιαγωγό και ο αρνητικός πόλος με τον n ημιαγωγό, τότε θα αυξηθεί η ροή των ηλεκτρονίων από την n περιοχή και των οπών από την p περιοχή. Στην περίπτωση αυτή όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6 το εξωτερικό πεδίο είναι αντίθετης πολικότητας από το εσωτερικό πεδίο στην περιοχή επαφής και επομένως το ελλατώνει.

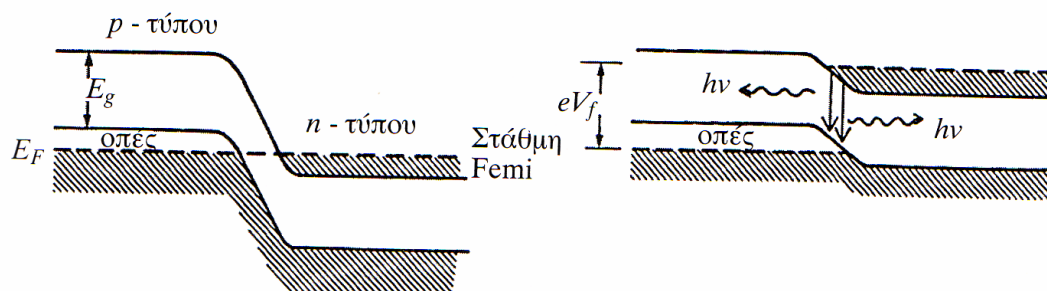
Η χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος της διόδου εικονίζεται παρακάτω:



**Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστική I-V diode laser [6]**

Η κίνηση αυτή των φορτίων που αποτελούν ένα ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργούν αναστροφή πληθυσμού και η επανασύνδεση φορέων έχει ως αποτέλεσμα την αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων.

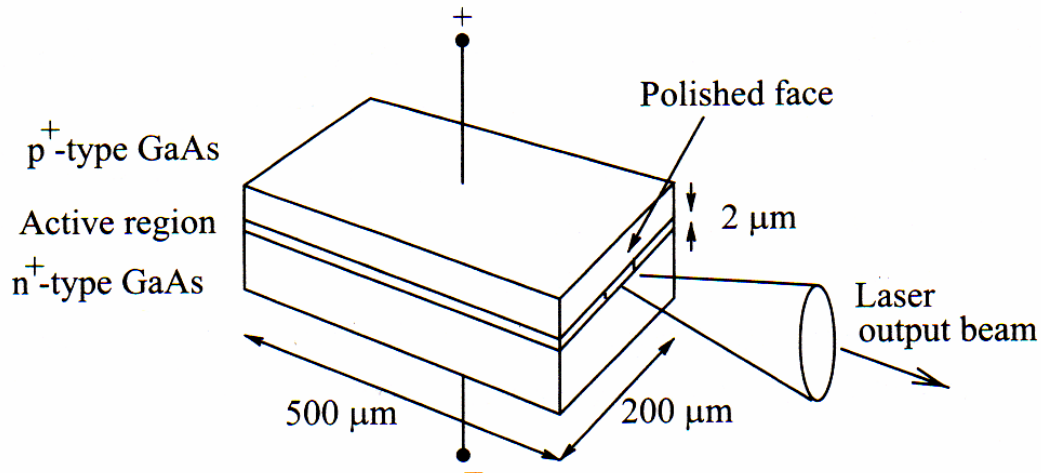
Η αναστροφή πληθυσμού λόγω έκχυσης των φορέων στην περιοχή της επαφής μεγιστοποιείται με τη χρήση ημιαγωγικών υλικών πολύ εμπλουτισμένων σε δότες και δέκτες (συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από  $10^{18}$  άτομα /  $\text{cm}^3$ ). Στην κατηγορία αυτή των ημιαγωγών οι στάθμες Fermi βρίσκονται μέσα στις ζώνες αγωγιμότητας (n περιοχή) και σθένους (p περιοχή).



**Σχήμα 2.8:** Ορθή Πόλωση P-N επαφής [5]

Στο 1<sup>ο</sup> μέρος της παραπάνω εικόνας δεν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο ενώ στο 2<sup>ο</sup> μέρος υπάρχει. Η αναστροφή πληθυσμού θα δημιουργηθεί στην περιοχή επαφής. Η εγχεόμενοι φορείς κατακάθονται πολύ γρήγορα ( $< 100$  fs) στις χαμηλότερες διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες αφήνοντας τα ηλεκτρόνια στο κάτω μέρος της ζώνης αγωγιμότητας και τις οπές στο πάνω μέρος της ζώνης σθένους. Η ενέργεια των φωτονίων είναι περίπου ίση με το ενεργειακό χάσμα των 2 ζωνών.

Η πιο απλή φωτο-δίοδος είναι μια pn επαφή κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό π.χ. GaAs. Η ενεργός περιοχή βρίσκεται στην επαφή των n και p επαφών. Η πιο απλή φωτοδίοδος, ονομάζεται και laser ομοεπαφής, εικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα



**Σχήμα 2.9:** Diode Laser Ομοεπαφής [6]

Σε ένα διοδικό laser οι εξωτερικές πλευρές της ενεργού περιοχής (οι 2 από αυτές) είναι ανακλαστικές στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Έτσι δημιουργείται ο οπτικός ταλαντωτής laser. Η ανακλαστικότητα των επιφανειών της ενεργού περιοχής μπορεί να προκύψει χωρίς να χρειαστεί να επέμβουμε. Αυτό εξασφαλίζεται λόγω της μεγάλης διαφοράς του δείκτη διάθλασης ανάμεσα στην τιμή του αέρα και αυτή του υλικού που είναι κατασκευασμένος ο ημιαγωγός. Π.χ. για το υλικό GaAs η ανακλαστικότητα των επιφανειών της ενεργού περιοχής είναι ίση με 32%. Η ανακλαστικότητα των επιφανειών που οφείλεται στην διαφορά των τιμών του δείκτη διάθλασης  $n$  του υλικού και του αέρα, γνωστή και ως ανακλαστικότητα Fresnel, μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση

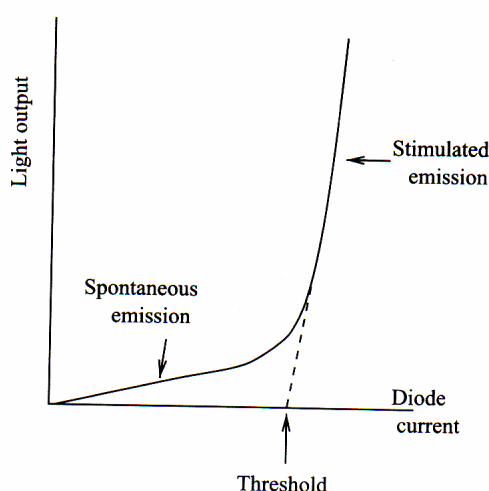
$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (2.3)$$

Η οπτική έξοδος ενός διοδικού laser συναρτήσει του ρεύματος που την διαρρέει απεικονίζεται στο σχήμα 2.10. Από το σχήμα αυτό βλέπουμε ότι η οπτική ακτινοβολία που παράγεται μέχρι το σημείο κατωφλίου αντιστοιχεί στην αυθόρμητη εκπομπή. Πέρα από το σημείο κατωφλίου η Η/Μ ακτινοβολία αντιστοιχεί σε εξαναγκασμένη εκπομπή. Παρατηρούμε επίσης ότι η απόδοση

της διόδου αυξάνει απότομα μετά το σημείο κατωφλίου. Η ισχύς εξόδου του laser ημιαγωγού μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$P = n \frac{hc}{e\lambda} (I - I_{th}) \quad (2.4)$$

Όπου  $n$  είναι η απόδοση της συσκευής,  $\lambda$  είναι το εκπεμπόμενο μήκος κύματος,  $I_{th}$  είναι το ρεύμα που αντιστοιχεί στο σημείο κατωφλίου.



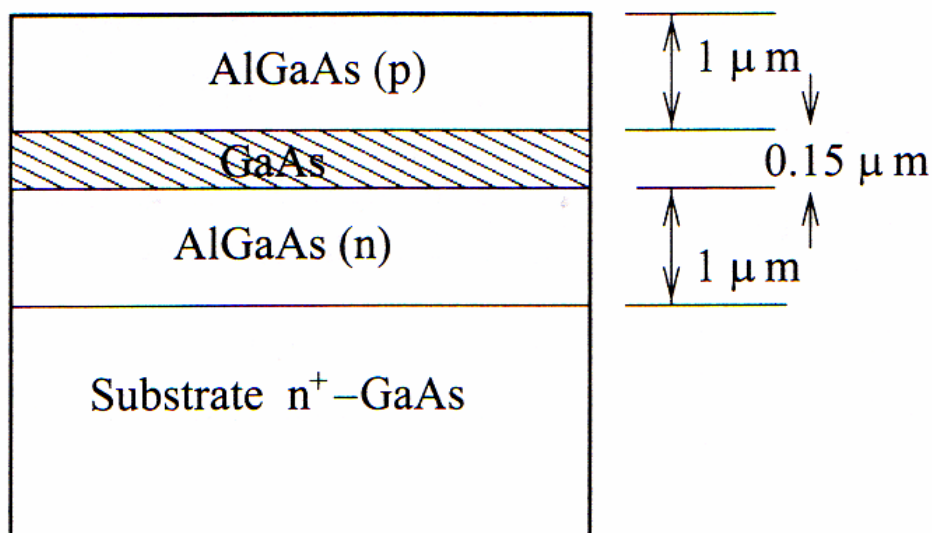
**Σχήμα 2.10:** Χαρακτηριστική Ισχύς – Ρεύματος [5]

Μια και το οπτικό αντηχείο ενός ημιαγωγικού laser είναι της τάξεως των μερικών microns η απόσταση μεταξύ των διαμήκη ρυθμών (FSR) είναι πολύ μεγαλύτερο από τα άλλα συστήματα laser. Στα diode lasers είναι της τάξεως των μερικών GHz.

Το προφίλ της δέσμης εξόδου έχει ελλειπτική μορφή μια και η επιφάνεια εκπομπής είναι παραλληλόγραμμου σχήματος και ο ρυθμός της κάθετης απόκλισης της δέσμης είναι μεγάλος ( $\sim 30^\circ$ ).

Τα πιο υψηλής απόδοσης laser ημιαγωγού χρησιμοποιούν ενεργό περιοχή που είναι κατασκευασμένη από περισσότερα από ένα υλικά. Τα lasers αυτά ονομάζονται lasers διπλής έτερο-επαφής. Η έτερο-επαφή δημιουργείται μεταξύ 2 ημιαγωγών διαφορετικού υλικού άρα και διαφορετικών ενεργειακών

χασμάτων. Παράδειγμα laser έτερο – επαφής είναι αυτό που είναι κατασκευασμένο από GaAs και GaAlAs και απεικονίζεται στο σχήμα 2.11.

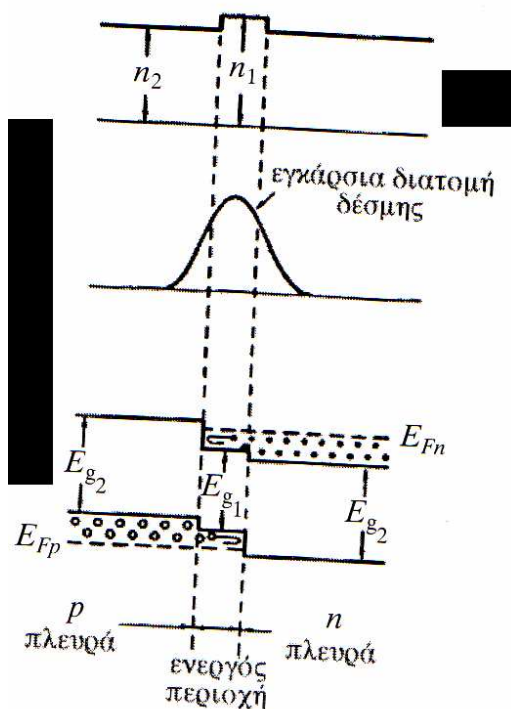


**Σχήμα 2.11:** Ημιαγωγός Έτερο-επαφής [5]

Η ενεργός περιοχή είναι κατασκευασμένη από GaAs το οποίο είναι τοποθετημένο ανάμεσα σε 2 στρώματα από n και p τύπου ημιαγωγούς τύπου AlGaAs. Το laser ημιαγωγού έτερο – επαφής έχει τρία βασικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με αυτό της όμοιο-επαφής. Αυτά είναι

- Εγκλωβίζει τους φορείς σε μια περιοχή όπου η επανασύνδεση τους είναι πολύ πιθανή.
- Η ενεργός περιοχή έχει υψηλότερο δείκτη διάθλασης από τα στρώματα που την περιβάλλουν με αποτέλεσμα την παγίδευση της ακτινοβολίας μέσα στο ενεργό μέσο (κυματοδήγησης). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης της εξαναγκασμένης εκπομπής.
- Λόγω της παραπάνω ιδιότητας οι απώλειες απορρόφησης της ακτινοβολίας στα στρώματα γύρω από την ενεργό περιοχή, περιορίζεται στο ελάχιστο.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα της έτερο-επαφής έχουν σαν αποτέλεσμα να έχει χαμηλότερο σημείο κατωφλίου από αυτό που έχει η όμοιο-επαφή. Τα χαρακτηριστικά της διπλής έτερο-επαφής απεικονίζονται στο σχήμα 2.12.

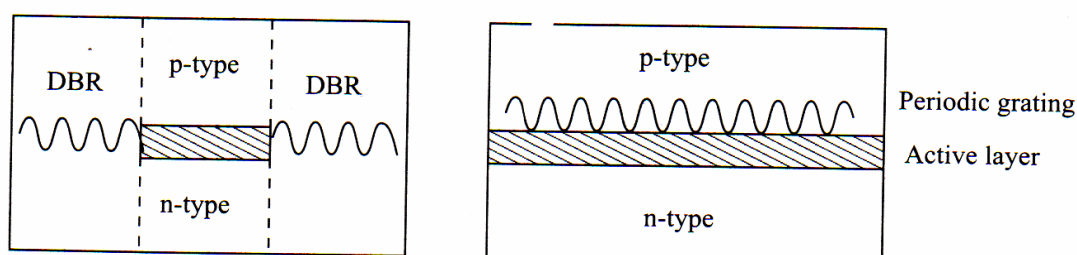


**Σχήμα 2.12:** Πλεονεκτήματα laser έτερο-επαφής [5]

Μια παραλλαγή της έτερο-επαφής είναι εάν μειώσουμε το πάχος της ενεργού περιοχής στις διαστάσεις του μήκους κύματος του ηλεκτρονίου ( $\sim 10$  nm), το οποίο δίνεται από την σχέση  $\lambda = h/p$  όπου  $p$  είναι η ορμή του ηλεκτρονίου και δίνεται από την σχέση (2.2). Μια και οι φορείς στην έτερο-επαφή εγκλωβίζονται μέσα στην ενεργό περιοχή όπου το ενεργειακό χάσμα είναι μικρότερο, τα ηλεκτρόνια και οι οπές εγκλωβίζονται μέσα σε ένα κβαντικό πηγάδι. Τα ενεργειακά επίπεδα σε ένα κβαντικό πηγάδι είναι κβαντισμένα και οι τιμές τους εξαρτώνται από τις διαστάσεις του κβαντικού πηγαδιού. Τα laser ημιαγωγού κβαντικών πηγαδιών είναι η κυρίαρχη σχεδίαση laser ημιαγωγού σήμερα.

Ο οπτικός ταλαντωτής σε ένα laser ημιαγωγού συνήθως δημιουργείται ανάμεσα στα ανακλαστικά επίπεδα της ενεργούς περιοχής.

Μια πιο αποδοτική σχεδίαση είναι η χρησιμοποίηση σαν ανακλαστήρα μιας περιοχής με περιοδική μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στα άκρα της ενεργού περιοχής. Ονομάζεται Bragg ανακλαστήρας.



**Σχήμα 2.13:** DBR laser [6]

Η ανάκλαση σε αυτή την περιοχή είναι φασματικά εξαρτώμενη. Τα κύματα που ανακλώνται από κάθε στοιχείο του Bragg ανακλαστήρα είναι σε φάση εάν ικανοποιείται η παρακάτω σχέση

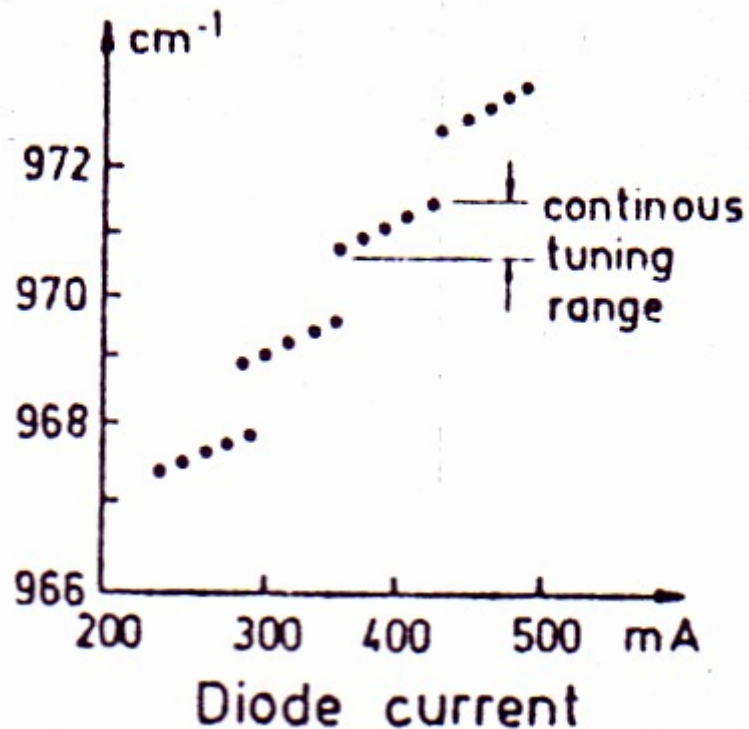
$$2n_{eff}\Lambda = m\lambda \quad (2.5)$$

Όπου  $n_{eff}$  είναι ο δείκτης διάθλασης Bragg ανακλαστήρα,  $m$  είναι ακέραιος αριθμός, και  $\Lambda$  είναι η περιοδικότητα του grating. Με κατάλληλη επιλογή του  $\Lambda$  μπορούμε να επιλέξουμε τον ρυθμό ταλάντωσης του laser. Όταν οι συχνότητες συντονισμού σε ένα laser ημιαγωγού περιορίζονται από την σχέση (2.5) τότε αυτό ονομάζεται DFB (Distributed Feedback ) laser. Παρόμοια αποτελέσματα έχουμε και εάν έχουμε την σχεδίαση που έχουμε στο 2<sup>ο</sup> σχήμα του παραπάνω σχήματος.

Οι ρυθμοί συντονισμού του ημιαγωγικού laser θα πρέπει να βρίσκονται μέσα στην καμπύλη κέρδους του ενεργού μέσου και την ίδια στιγμή να αποτελούν και συχνότητες συντονισμού του οπτικού ταλαντωτή.

Η επιλογή της συχνότητας συντονισμού του diode laser μπορεί να γίνει μεταβάλλοντας το μήκος του ταλαντωτή, ή μεταβάλλοντας τον δείκτη διάθλασης του ενεργού μέσου μεταβάλλοντας την θερμοκρασία του, ή

μεταβάλλοντας το ρεύμα άντλησης που διαρρέει την ενεργό περιοχή. Το διάγραμμα του σχήματος 2.14 δείχνει μια χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής της συχνότητας εκπομπής του ημιαγωγικού laser μεταβάλλοντας το ρεύμα άντλησης.



**Σχήμα 2.14:** Ρύθμιση συχνότητας εξόδου με το ρεύμα άντλησης [6]

Η λειτουργία του diode laser σε ένα διαμήκη ρυθμό περιορίζεται φασματικά μονάχα για ένα FSR. Πέρα από αυτό το φασματικό εύρος η λειτουργία του diode laser 'πηδάει' σε άλλο διαμήκη ρυθμό.

Για τον  $N_{th}$  διαμήκη ρυθμό ισχύει

$$N_{th} = \frac{2nd}{\lambda} \quad (2.6)$$

Όπου  $d$  είναι το μήκος του οπτικού ταλαντωτή και  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του ενεργού μέσου.

Η φασματική απόσταση μεταξύ 2 διαμήκη ρυθμών δλ το FSR δηλαδή, βρίσκεται από την παραγωγή της (2.6) ως προς λ. Έτσι έχουμε

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nd} \left( 1 - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

Στις παρακάτω παραγράφους θα αναλύσουμε μερικές από τις πιο βασικές εφαρμογές των diode laser.

Τα diode lasers χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στα DVD players. Η δέσμη του laser εστιάζεται σε διαφορετικά σημεία, διαφορετικού πάχους, του DVD δίσκου διαβάζοντας έτσι τις πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες, με τη μορφή 0 και 1, στα σημεία αυτά.



**Σχήμα 2.15:** CD player (Διαδίκτυο) [6]

Κάθε σημείο ενός στρώματος διαβάζεται σε κάθε περιστροφή του δίσκου. Η πληροφορία που είναι αποθηκευμένη σε διαφορετικά στρώματα του δίσκου διαβάζεται μετακινώντας τον φακό εστίασης που βρίσκεται μπροστά από το diode lasers. Σε όσο πιο μικρή δέσμη μπορούμε να εστιάσουμε την δέσμη laser τόσο πιο πολύ πληροφορία θα μπορούμε να αποθηκεύουμε σε ένα δίσκο. Σήμερα μπορούμε να εστιάσουμε την δέσμη του diode laser ως και

μισό τετραγωνικό μικρόμετρο, το οποίο συνεπάγεται 0.25 MB πληροφορία σε κάθε τετραγωνικό χιλιοστό.

Από φθηνά από άποψη οικονομικού κόστους diode laser είναι κατασκευασμένα τα laser pointers. Μαζί με ένα φακό δημιουργούν μια παράλληλη φωτεινή δέσμη φωτός η οποία χρησιμοποιείται για την κατάδειξη διαφόρων αντικειμένων κυρίως σε περίπτωση ομιλιών.

Καταδεικτές laser χρησιμοποιούνται σε όπλα για να γίνει ορατή η διαδρομή του βλήματος στον σκοπευτή αλλά και για να αποκαλυφτεί ο στόχος.



**Σχήμα 2.16:** Καταδεικτής laser [6]

Τα diode lasers χρησιμοποιούνται στην πλοήγηση των αεροσκαφών. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατασκευή γυροσκοπίου που οδηγείται από diode laser. Με αυτό τον τρόπο θα αντικατασταθούν τα σημερινά συστήματα γυροσκοπίου (αποτελεί το κύριο όργανο πλοήγησης ενός α/φ) με πολύ πιο ελαφριά και οικονομικά συστήματα.

Η χρήση των diode lasers στην ιατρική και κυρίως στην φωτοδυναμική θεραπεία, στην μη επεμβατική χειρουργική, ως διαγνωστικό μέσο αυξάνει χρόνο με το χρόνο.

Τα diode lasers χρησιμοποιούνται και σαν radar μέτρησης της ταχύτητας από την αστυνομία.



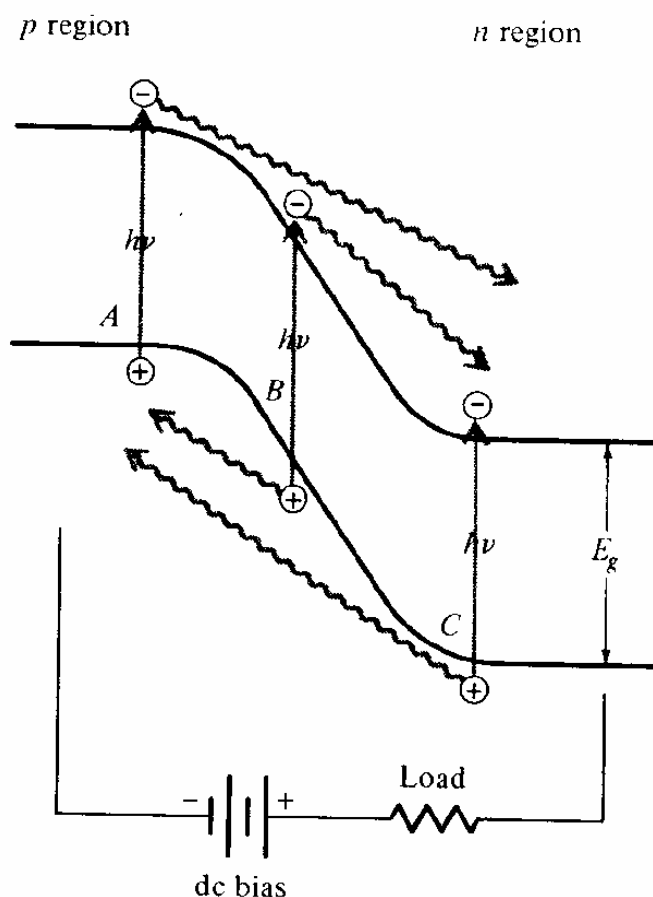
**Σχήμα 2.17:** Ταχύμετρο [6]

Η δέσμη laser χτυπάει τον κινούμενο στόχο και ανακλάται. Η συχνότητα της ανακλώμενης δέσμης είναι τόσο πιο υψηλή όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αυτοκινήτου στόχου. Για να είναι επιτυχημένη η μέτρηση θα πρέπει να στοχεύσουμε σε υψηλά ανακλούσα επιφάνεια του αυτοκινήτου, πινακίδες κυκλοφορίας, και να πάρουμε την μέτρηση από μπρος ή από πίσω από το αυτοκίνητο στο ίδιο με αυτό ύψος.

Τα diode lasers υιοθετούνται και στα αποστασιόμετρα laser. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται στο στρατό, από κατασκευαστές και τελευταία από τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Στις τελευταίες τα αποστασιόμετρα χρησιμοποιούνται ως βοηθήματα για παρκάρισμα άλλα και για να κλειδώνουν την απόσταση μεταξύ των αυτοκινήτων για ασφαλή και αποτελεσματική οδήγηση.

## 2.2 Η φωτοδίοδος

Οι επαφές p-n είναι οι πιο δημοφιλείς συσκευές ανίχνευσής της οπτικής ακτινοβολίας. Οι συσκευές αυτές είναι γνωστές ως φωτο-δίοδοι. Ο μηχανισμός ανίχνευσης της οπτικής ακτινοβολίας από μια φωτοδίοδο απεικονίζεται στο σχήμα 2.18.



**Σχήμα 2.18:** Αρχή λειτουργίας της φωτοδίοδου [5]

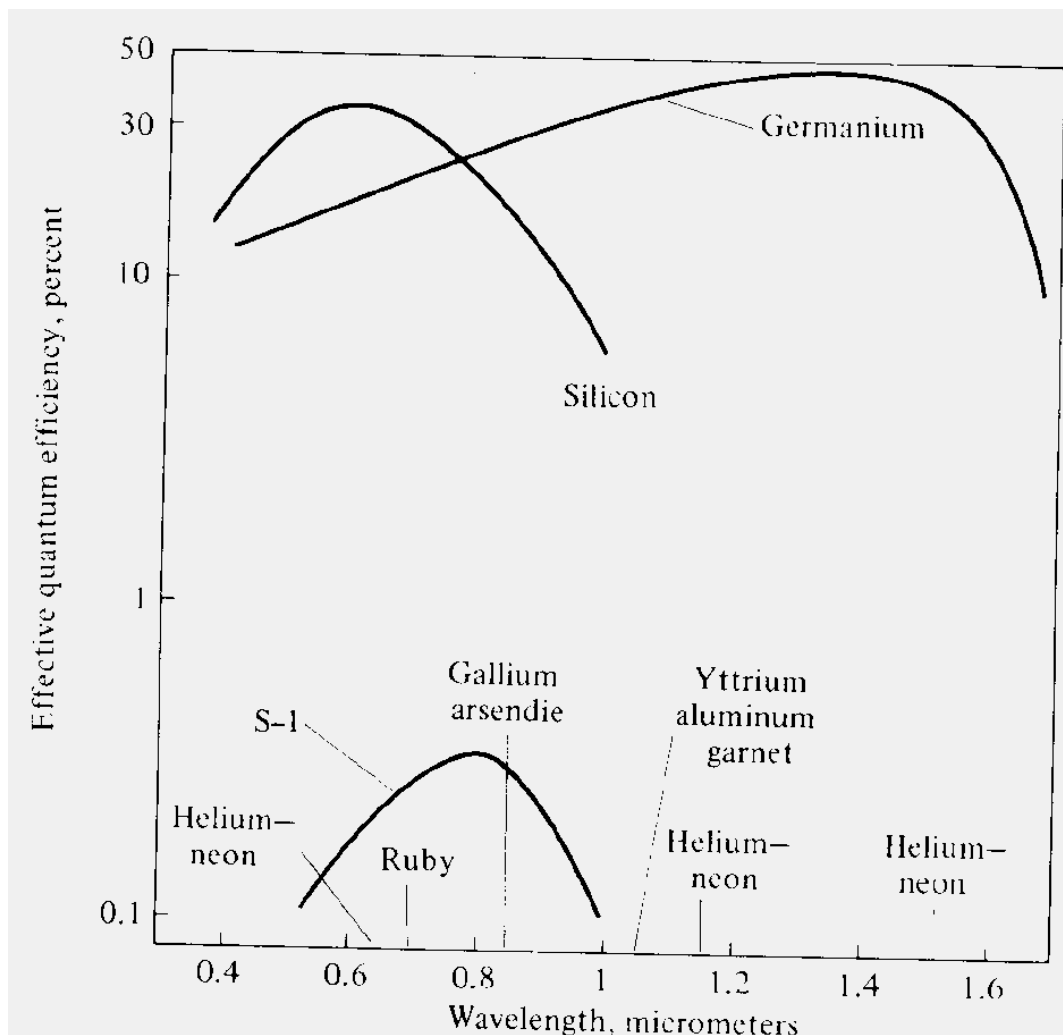
Το φωτόνιο προσπίπτει στο σημείο A (περιοχή p) και δημιουργεί ένα ζεύγος ελεύθερου ηλεκτρονίου και μιας οπής. Οι δυο αυτοί φορείς υπό την επίδραση της εξωτερικής πόλωσης κινούνται τα μεν ελεύθερα ηλεκτρόνια προς την περιοχή n ενώ οι οπές προς την περιοχή p αυξάνοντας έτσι το ρεύμα που διαρρέει το εξωτερικό κύκλωμα του σχήματος 2.18. Θα πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι οι οπές και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται λόγω της οπτικής ακτινοβολίας θα ενισχύσουν το ρεύμα του εξωτερικού κυκλώματος αρκεί τα σημεία A, B, C (βλέπε σχήμα 2.18) να βρίσκονται μέσα

στο μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας της επαφής  $p - n$ . Το σημείο στο οποίο είναι επιθυμητό να προσπέσει το φωτόνιο και να παράγει ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές είναι το σημείο B (βλέπε σχήμα 2.1) μια και η απόσταση που έχουν να διανύσουν οι φορείς είναι η μικρότερη, αυξάνοντας έτσι τον χρόνο αντίδρασης της φωτοδιόδου άλλα και την κβαντική της απόδοση (σχεδόν για κάθε προσπίπτον φωτόνιο αντιστοιχεί και ένας ελεύθερος φορέας).

Είναι φανερό από σχήμα 2.18 ότι μια φωτοδίοδος μπορεί να ανιχνεύσει ακτινοβολία της οποίας η συχνότητα ικανοποιεί την σχέση

$$h\nu > E_g \quad (2.8)$$

όπου  $E_g$  είναι το ενεργειακό χάσμα σε ένα κρύσταλλο ημιαγωγού. Θα πρέπει όμως να προσεχθεί ότι η απορρόφηση γίνεται όλο και πιο έντονη καθώς η συχνότητα της ακτινοβολίας αυξάνει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα εάν οπτική ακτινοβολία για την οποία ισχύει  $h\nu \gg E_g$ , προσπέσει κοντά στην  $n$  περιοχή οι φορείς μειονότητας που θα γεννηθούν δεν θα προλάβουν να περάσουν το φράγμα δυναμικού μια και θα απορροφηθούν πολύ γρήγορα από τον κρύσταλλο του ημιαγωγού με αποτέλεσμα οι φορείς αυτοί να μην συνεισφέρουν στο ρεύμα του εξωτερικού κυκλώματος. Για αυτό η κβαντική απόδοση των φωτοδιόδων πέφτει καθώς  $h\nu > E_g$ . Τυπικές καμπύλες απόκρισης διάφορων φωτοδιόδων απεικονίζονται στο σχήμα 2.19.



**Σχήμα 2.19:** Καμπύλες απόκρισης διαφόρων φωτοδιόδων [5]

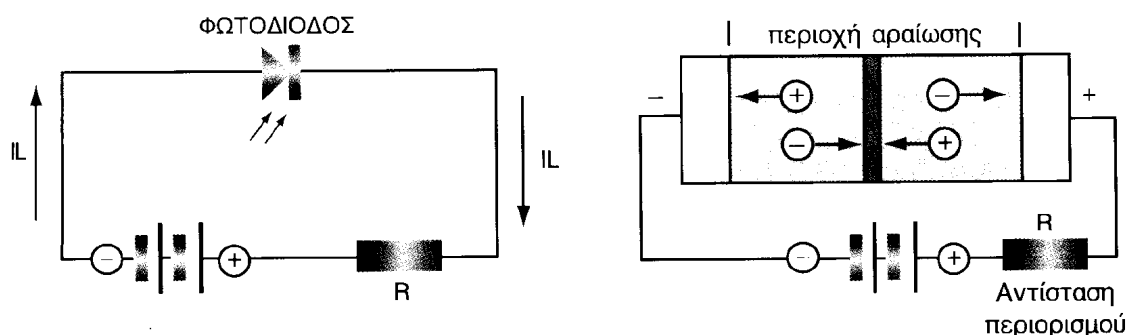
Ένα από τα πιο σπουδαία χαρακτηριστικά μιας φωτοδιόδου είναι το πόσο γρήγορα ανταποκρίνεται σε μεταβολές της έντασης μιας διαμορφωμένης προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι τρεις παράγοντες που περιορίζουν τον χρόνο αντίδρασης μιας φωτοδιόδου είναι οι παρακάτω:

1. Ο χρόνος διάχυσης των φορέων που παράγονται στις  $p$  και  $n$  περιοχές. Η επίδραση του χρόνου αυτού στον χρόνο αντίδραση της φωτοδιόδου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί από την κατάλληλη επιλογή του μήκους της περιοχής απογύμνωσης.
2. Ο χρόνος που χρειάζονται να διασχίσουν την περιοχή απογύμνωσης οι φορείς που γέννιούνται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

3. Το άνω όριο με τον οποίο μπορεί να διαμορφωθεί μια πηγή και ταυτόχρονα να μπορεί να ανιχνευθεί από την φωτοδίοδο καθορίζεται και από την χωρητικότητα της διόδου  $C_d$  και από την αντίσταση  $R_e$  που εκφράζει την ισοδύναμη αντίσταση που συνδέεται παράλληλα με την χωρητικότητα  $C_d$ , σύμφωνα με την σχέση

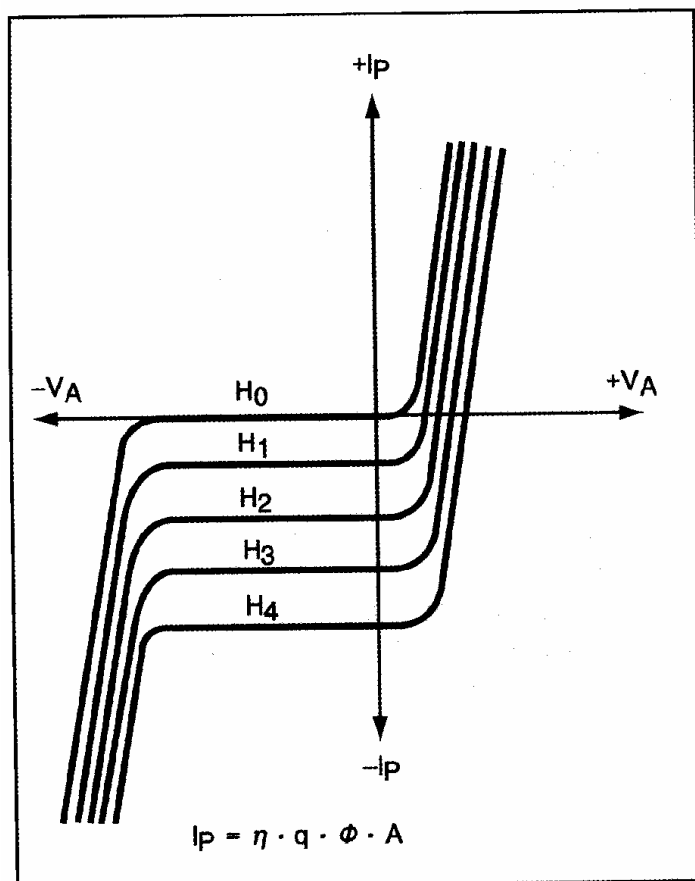
$$w_m \leq \frac{1}{R_e C_d} \quad (2.9)$$

Στο σχήμα 2.20 απεικονίζεται ένα χαρακτηριστικό κύκλωμα πόλωσης μιας φωτοδίοδου.



**Σχήμα 2.20:** Κύκλωμα φωτοδίοδου [7]

Η χαρακτηριστική λειτουργίας τάσης – ρεύματος για μια φωτοδίοδο για διαφορετικούς φωτισμούς απεικονίζεται στο σχήμα 2.21. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει η φωτεινή ένταση η χαρακτηριστική βυθίζεται περισσότερο στο τρίτο τεταρτημόριο της γραφικής παράστασης του σχήματος 2.21. Με άλλα λόγια όσο μεγαλύτερη είναι η ακτινοβολία τόσο πιο χαμηλά τέμνουν οι καμπύλες τον κάθετο άξονα του ρεύματος.



όπου

$\eta$  = κβαντική αποδοτικότητα,

$q$  = ηλεκτρονικό φορτίο  $1.6 \cdot 10^{-19}$  coulombs

$\Phi$  = πυκνότητα φωτοροής photons/sec-cm<sup>2</sup>,

$A$  = επιφάνεια σε cm<sup>2</sup>

$H$  = ένταση φωτισμού lumen/m<sup>2</sup>

**Σχήμα 2.21:** Χαρακτηριστική λειτουργίας φωτοδιόδου [7]

## 2.3 Σχήματα Διαμόρφωσης

Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των διοδικών lasers, των LED αλλά και των φωτοδιόδων είναι οι τηλεπικοινωνίες. Στις τηλεπικοινωνίες η πληροφορία που πρόκειται να μεταδοθεί κωδικοποιείται σε μια φέρουσα δέσμη η οποία μεταβιβάζεται με ένα κατάλληλο μέσο. Η διαμορφωμένη δέσμη συλέγεται από τον φωτο-ανιχνευτή (π.χ. φωτοδίοδος) όπου και αποκωδικοποιείται.

Η οπτική δέσμη που μεταφέρει την πληροφορία χαρακτηρίζεται από το πλάτος της, την συχνότητα ή το μήκος κύματος της και την φάση όπως επίσης και την ένταση της (καθορίζεται από το πλάτος της). Όλοι αυτοί οι παράμετροι μπορούν να διαμορφωθούν προκειμένου να μεταφέρουν την πληροφορία. Αντίστοιχα στον φωρατή η αντίστοιχη ποσότητα αποδιαμορφώνεται προκειμένου να αποκωδικοποιηθεί η μεταφερόμενη από την δέσμη πληροφορία.

### 2.3.1 Διαμόρφωση Πλάτους (AM – Amplitude Modulation)

Η διαμόρφωση πλάτους χρησιμοποιείται κυρίως για την μεταφορά πληροφορίας με μικροκύματα. Είναι γνωστή στην βιβλιογραφία αλλά και στον τεχνολογικό τομέα ως AM (Amplitude Modulation) διαμόρφωση.

Το ηλεκτρικό πεδίο που περιγράφει το σήμα του laser μπορεί να περιγραφεί από την σχέση

$$E_c = E_{co} \sin \omega_c t \quad (2.10)$$

Το διαμορφωμένο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο μεταφέρει την πληροφορία, περιγράφεται από

$$E_m = E_{mo} \sin \omega_m t \quad (2.11)$$

Είναι ευκόλως κατανοητό ότι το πλάτος του σήματος  $E_{co}$  γίνεται ανάλογο της στιγμιαίας τάσης διαμόρφωσης  $E_{mo} \sin \omega_m t$ . Μάλιστα ο δείκτης διαμόρφωσης καθορίζεται από την σχέση

$$m = \frac{E_{mo}}{E_{co}} \quad (2.12)$$

Επομένως το στιγμιαίο πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου ενός σήματος που μεταφέρει την πληροφορία είναι:

$$A = E_{co} + E_{cm} = E_{co} + E_{mo} \sin w_m t = E_{co} (1 + m \sin w_m t) \quad (2.13)$$

Έτσι το ηλεκτρικό πεδίο που μεταφέρει την πληροφορία περιγράφεται από την γενικότερη σχέση

$$E'_c = A \sin w_c t = E_{co} (1 + m \sin w_m t) \sin w_c t = E_{co} \sin w_c t + m E_{co} \sin w_m t \sin w_c t \quad (2.14)$$

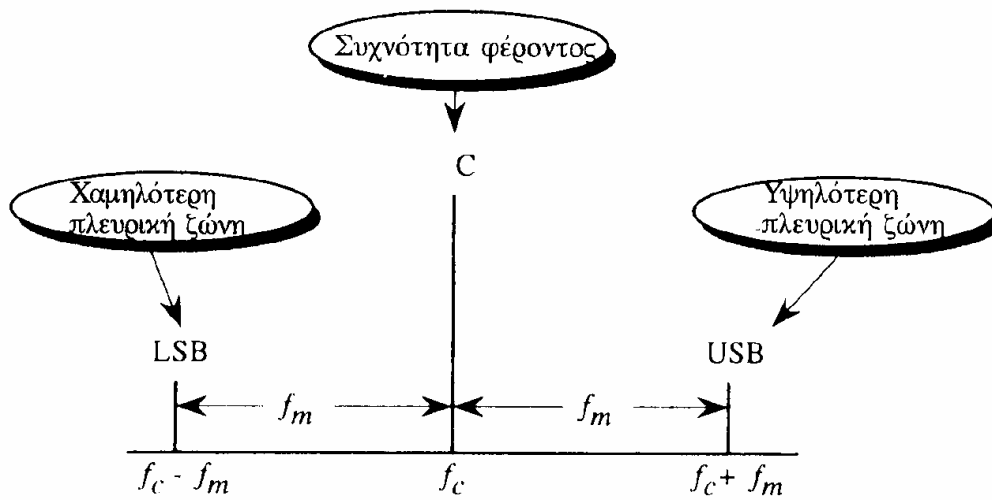
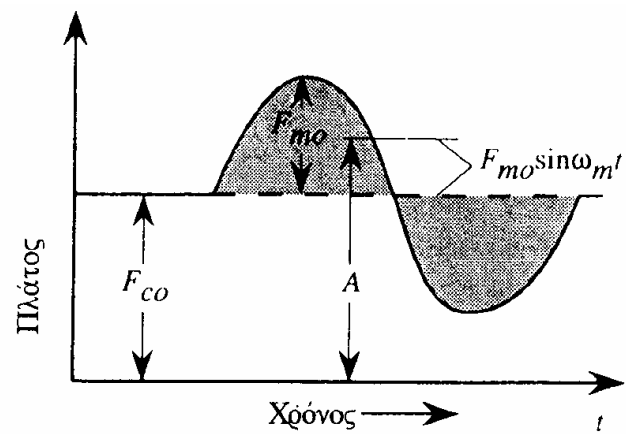
Από τριγωνομετρία γνωρίζουμε ότι

$$\sin w_1 t \sin w_2 t = \frac{1}{2} [\cos(w_1 - w_2)t - \cos(w_1 + w_2)t] \quad (2.15)$$

Η (2.14) βάσει της (2.15) μπορεί να γραφεί ως

$$E'_c = E_{co} \sin w_c t + \frac{m E_{co}}{2} \cos(w_c - w_m)t - \frac{m E_{co}}{2} \cos(w_c + w_m)t \quad (2.16)$$

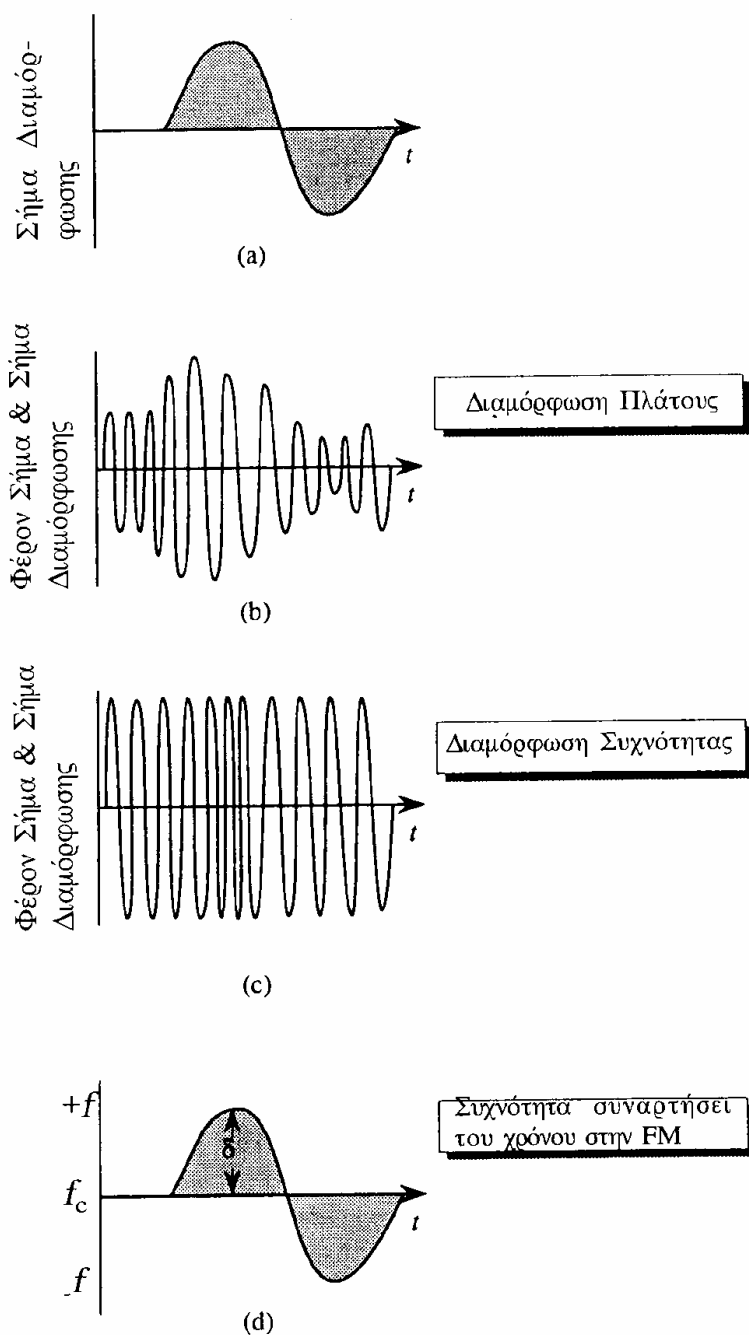
Παρατηρούμε από την σχέση (2.16) που περιγράφει το διαμορφωμένο σήμα ότι το τελευταίο περιέχει τρεις όρους : α) τον αδιαμόρφωτο όρο, β) μια ανώτερη πλευρική ζώνη (USB) με συχνότητα  $(w_c + w_m)$  και γ) μια κατώτερη πλευρική ζώνη (LSB) με συχνότητα  $(w_c - w_m)$ . Για να αποκωδικοποιείται το μεταφερόμενο σήμα θα πρέπει ο φωρατής να μπορεί να απομονώνει την USB ή την LSB. Ένα σήμα διαμορφωμένο κατά πλάτος απεικονίζεται στο σχήμα 2.22.



**Σχήμα 2.22:** Το πλάτος του διαμορφωμένου κατά πλάτος φέροντος κύματος και οι συνιστώσες συχνότητας του φέροντος κύματος [8]

### 2.3.2 Διαμόρφωση Συχνότητας (FM – Frequency Modulation)

Μια άλλη μορφή διαμόρφωσης είναι η διαμόρφωση της συχνότητας εκπομπής γνωστή ως FM διαμόρφωση (βλέπε σχήμα 2.23)



**Σχήμα 2.23:** α) Σήμα διαμόρφωσης, β) Σήμα με AM διαμόρφωση, γ) Σήμα με FM διαμόρφωση και δ) Σήμα FM διαμόρφωσης [8]

Το πεδίο που περιγράφει το σήμα μας (π.χ. δέσμη laser) μπορεί να περιγραφεί από την γενικότερη σχέση

$$E_c = E_{co} \sin(w_c t + f) \quad (2.17)$$

Όπου  $\phi$  είναι η φάση του σήματος. Επίσης το σήμα διαμόρφωσης αντικατροπτίζεται από την σχέση

$$E_m = E_{mo} \cos w_m t \quad (2.18)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.17), (2.18) προκύπτει ότι η συχνότητα του διαμορφωμένου σήματος είναι:

$$f = f_c (1 + k F_{mo} \cos w_m t) \quad (2.19)$$

όπου  $k$  είναι μια σταθερά αναλογίας η οποία εξαρτάται από τις λεπτομέρειες του τρόπου με τον οποίο γίνεται η διαμόρφωση. Τα ακρότατα στην συχνότητα θα συμβούν στα σημεία όπου ο όρος  $\cos w_m t = \pm 1$  επομένως η (2.19) για τις 2 ακραίες αυτές τιμές γίνεται

$$f = f_c (1 \pm k F_{mo}) \quad (2.20)$$

Επομένως το σήμα που μεταφέρει την πληροφορία (διαμορφωμένο σήμα) μπορεί να περιγραφεί από την σχέση

$$E'_c = E_{co} \sin \chi F(w_c, w_m) \approx E_{co} \sin q \quad (2.21)$$

Η γωνία  $\theta$  του σήματος της (2.21) προκύπτει μέσω της ολοκλήρωσης της κυκλικής συχνότητας  $\omega$  του διαμορφωμένου σήματος.

$$\begin{aligned}
 q &= \int \omega dt = \int \omega_c (1 + kF_{mo} \cos \omega_m t) dt = \omega_c \int (1 + kF_{mo} \cos \omega_m t) dt \\
 &= \omega_c t + \frac{kF_{mo} f_c \sin \omega_m t}{f_m}
 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Ορίζοντας ως  $d = kF_{mo} f_c$  η (2.22) γράφεται ως

$$q = \omega_c t + \frac{d}{f_m} \sin \omega_m t \quad (2.23)$$

Αντικαθιστώντας την (2.23) στην (2.21) προκύπτει ότι

$$E'_c = E_{co} \sin \left( \omega_c t + \frac{d}{f_m} \sin \omega_m t \right) = E_{co} \sin (\omega_c t + m_f \sin \omega_m t) \quad (2.24)$$

όπου  $m_f$  είναι ο δείκτης διαμόρφωσης.

### 2.3.3 Διαμόρφωση Έντασης

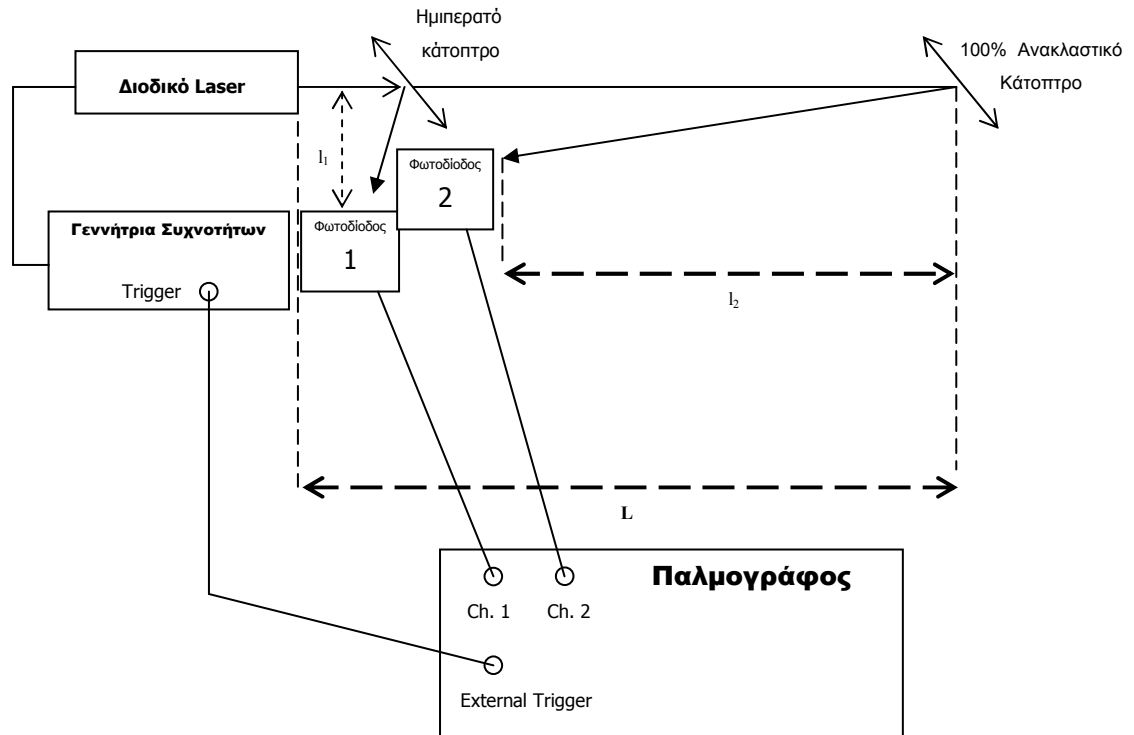
Ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος και απλός τρόπος διαμόρφωσης είναι αυτό στις έντασης της δέσμης. Αυτό γιατί είναι πιο εύκολο να αποκωδικοποιηθεί ένα τέτοιο σήμα. Ο τρόπος αυτός φώρασης (IM – intensity modulation) παρουσιάζει δυο βασικά μειονεκτήματα. Α) Τα επίπεδα θορύβου που παρουσιάζει είναι υψηλά και β) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πλήρες εύρος ζώνης.

## **2.4 Αναφορές**

- [1]** Σημειώσεις μαθήματος 'Τεχνολογία των lasers', Δρ. Κ.Πετρίδης, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Τεχνολογικό Ίδρυμα Κρήτης
- [2]** 'Lasers: Φυσική και Τεχνολογία', Π. Περσεφόνης
- [3]** <http://www.tunl.duke.edu/~cosen/phy217/MottScatteringReport/node18.html>
- [4]** MSc Notes "Optoelectronics and Laser Devices", University of St-Andrews
- [5]** 'Optical Electronics', Yariv
- [6]** <http://britneyspears.ac/physics/basics/basics.htm>
- [7]** 'Οπτοηλεκτρονική: Εργαστηριακές Ασκήσεις', Α. Αλεξανδρή
- [8]** 'Οπτοηλεκτρονική', J. Singh

### 3.1 Πειραματική διάταξη

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται ένα διάγραμμα της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ταχύτητας του φωτός στο κενό.



**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα πειραματικής διάταξης

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εργασίας αυτής είναι τα παρακάτω:

1. Διοδικό laser (μήκος κύματος  $\lambda = 680 \text{ nm}$ ,  $P_{\text{out}} = 1 \text{ mW}$ )
2. Δύο φωτοδίοδοι (BPW34)
3. Ημιπερατό και πλήρως ανακλαστικό κάτοπτρο
4. Γεννήτρια συχνοτήτων
5. Παλμογράφος
6. BNC καλώδια

Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται το υλοποιημένο οπτοηλεκτρονικό σύστημα.



**Σχήμα 3.2:** Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική μέτρηση της ταχύτητας του φωτός. Απεικονίζονται οι φωτοδιόδοι που χρησιμοποιήθηκαν, το διοδικό laser, το τροφοδοτικό και ο παλμογράφος.

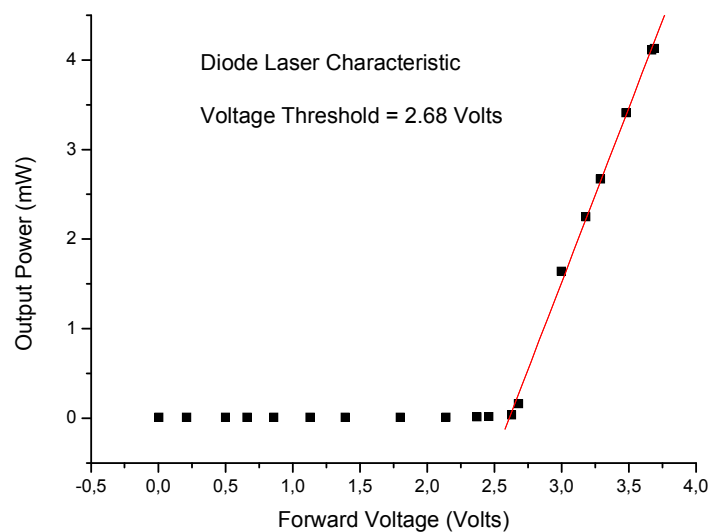
Στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα προχωρήσουμε σε μια σύντομη περιγραφή – χαρακτηρισμό των βασικών στοιχείων του συστήματος αυτού (διοδικό laser, φωτοδίοδος), θα ακολουθήσει μια περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και στο τέλος θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που έχουν ληφθεί σχετικά με την μέτρηση της ταχύτητας του φωτός.

### 3.2 Διοδικό laser

Το διοδικό laser (η αρχή λειτουργίας του αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2) που χρησιμοποιήθηκε ως η οπτική πηγή του συστήματος μας είναι ένα απλό και φθηνό (3,00 €) laser pointer του εμπορίου. Η φασματική του εκπομπή βρίσκεται στα 680 nm. Στο **σχήμα 3.3** απεικονίζεται η χαρακτηριστική του διοδικού laser η οποία σχεδιάστηκε βάση των μετρήσεων του **πίνακα 1**. Η μέγιστη ισχύς του είναι μικρότερη από 5 mW. Από το σχήμα 3.3 μπορούμε να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι σε θερμοκρασία δωματίου η τάση κατωφλίου του laser αυτού είναι στα 2.68 Volts.

| <i><b>Ισχύς Εξόδου (mW)</b></i> | <i><b>Τάση Πόλωσης (Volts)</b></i> |
|---------------------------------|------------------------------------|
| 0.0043                          | 0.00785                            |
| 0.21                            | 0.00841                            |
| 0.50                            | 0.00851                            |
| 0.66                            | 0.00877                            |
| 0.86                            | 0.00899                            |
| 1.13                            | 0.00903                            |
| 1.39                            | 0.00907                            |
| 1.80                            | 0.00916                            |
| 2.14                            | 0.0109                             |
| 2.37                            | 0.0142                             |
| 2.46                            | 0.0162                             |
| 2.63                            | 0.0352                             |
| 2.68                            | 0.16                               |
| 3.0                             | 1.64                               |
| 3.18                            | 2.25                               |
| 3.29                            | 2.67                               |
| 3.48                            | 3.41                               |
| 3.67                            | 4.11                               |
| 3.69                            | 4.13                               |

**Πίνακας 1:** Ισχύς εξόδου ως προς την τάση πόλωσης



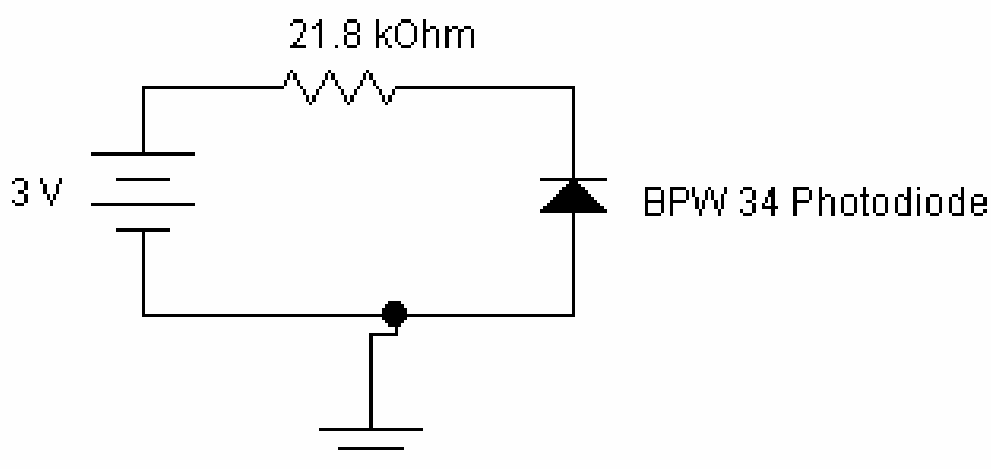
**Σχήμα 3.3:** Χαρακτηριστική Εξόδου Ημιαγωγικού Laser

Στο **σχήμα 3.3** απεικονίζεται η χαρακτηριστική του διοδικού laser η οποία σχεδιάστηκε βάση των μετρήσεων του **πίνακα 1**. Η μέγιστη ισχύς του είναι μικρότερη από 5 mW. Από το σχήμα 3.3 μπορούμε να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι σε θερμοκρασία δωματίου η τάση κατωφλίου του laser αυτού είναι στα 2.68 Volts.

### 3.3 Ανιχνευτές φωτός – Φωτοдиодοι

Η βασική θεωρία των φωτοδιόδων παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2. Στην πειραματική μας διάταξη χρησιμοποιήθηκαν δυο όμοιοι φωτοдиодοι τύπου BPW34 οι χαρακτηριστικές των οποίων μπορούν να μελετηθούν μέσω του διαδικτύου στην διεύθυνση <http://downloads.solarbotics.com/PDF/bpw34.pdf>. Έχουν πολύ απόκριση στα 680 nm που είναι η φασματική έξοδος του διοδικού μας laser.

Οι δυο φωτοдиодοι πολώνονται ανάστροφα βάση του κυκλώματος που απεικονίζεται στο σχήμα 3.4.



**Σχήμα 3.4:** Εσωτερικό κύκλωμα BPW 34

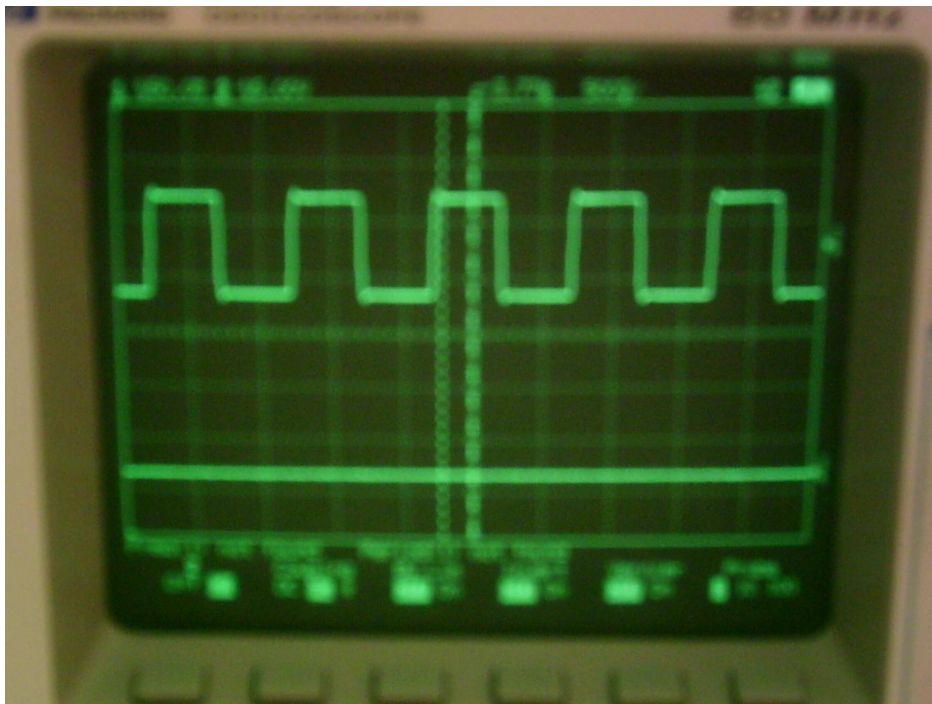
Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το παραπάνω κύκλωμα είναι ανάλογο με την ένταση του φωτός που προσπίπτει πάνω στην φωτοдиодο BPW 34.

### **3.4 Παλμογράφος και Γεννήτρια συχνοτήτων**

Η γεννήτρια συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκε και ο παλμογράφος είναι όργανα που μπορούν να βρεθούν σε οποιοδήποτε προπτυχιακό εργαστήριο. Η μοναδική απαίτηση από τον παλμογράφο είναι να διαθέτει εξωτερικό σκανδαλισμό (external triggering).

### **3.5 Πειραματική διαδικασία**

Με την βοήθεια του παλμογράφου ελέγχουμε το ac σήμα που παράγει η γεννήτρια συχνοτήτων να έχει πλάτος μεγαλύτερο από μηδέν (για να μην τυχόν πολώσουμε ανάστροφα την δίοδο και την καταστρέψουμε) και μικρότερο από τα 4.5 V για να μην καταστραφεί η δίοδος μας λόγω της υψηλής ισχύς εξόδου. Η γεννήτρια επίσης ρυθμίζεται να παράγει τετραγωνικούς παλμούς συχνότητας 1 MHz. Το σήμα που εκπέμπει η δίοδος απεικονίζεται στο σχήμα 3.5.

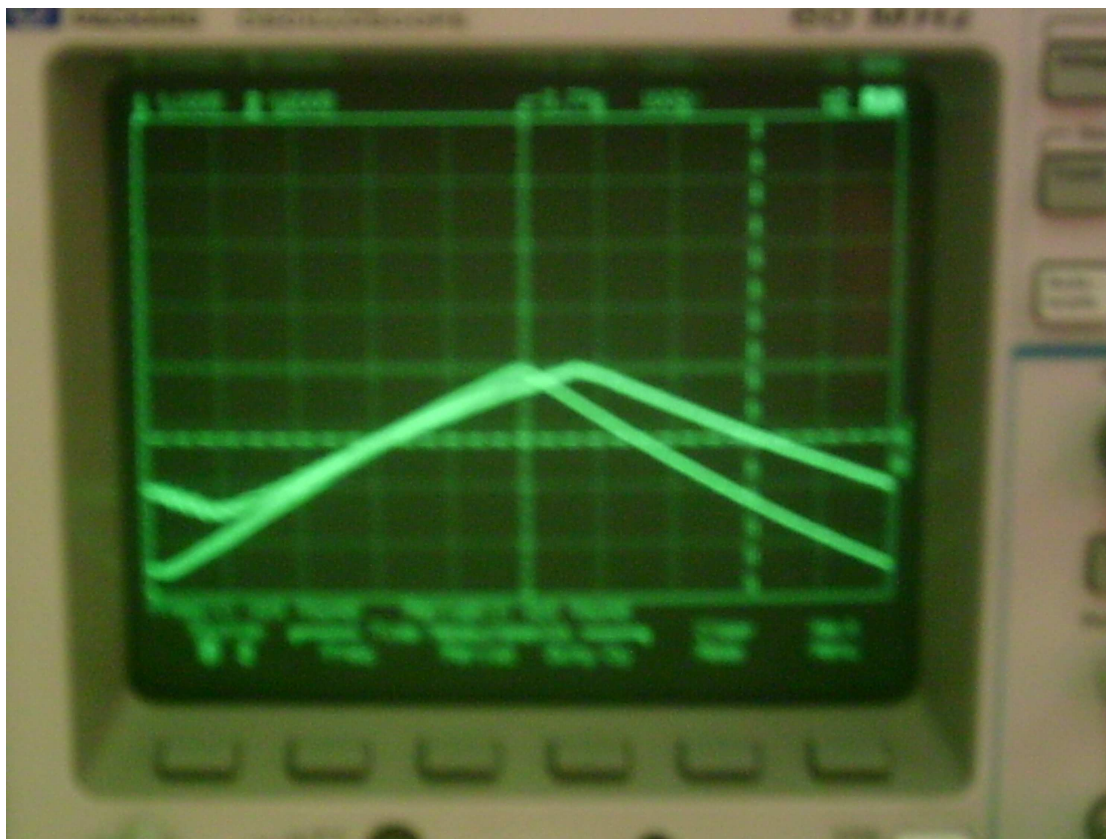


**Σχήμα 3.5:** Παλμός τροφοδοσίας laser όπως απεικονίζεται στον παλμογράφο

Στην συνέχεια οι ακροδέκτες του laser pointer συνδέονται με την έξοδο της γεννήτριας συχνοτήτων. Το laser με βάση την συνδεσμολογία αυτή παράγει φωτεινούς παλμούς ίδιας συχνότητας (βλέπε σχήμα 3.5)

Βάση της πειραματικής διάταξης που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1 ένα μέρος της δέσμης του laser ανακλάται από το ημιπερατό κάτοπτρο και ανιχνεύεται από την φωτοδίοδο  $PD_1$  η οποία είναι τοποθετημένη σε απόσταση περίπου 50 cm από το laser. Το υπόλοιπο μέρος της δέσμης κατευθύνεται προς το μη περατό κάτοπτρο, το οποίο βρίσκεται σε δεδομένη απόσταση  $L$  ανακλάται και ανιχνεύεται από την φωτοδίοδο  $PD_2$ . Λόγω του ότι η δέσμη που κατευθύνθηκε προς το μη περατό κάτοπτρο έχει διευρυνθεί χωρικά η χρήση ενός συγκλίνοντα φακού μπροστά από την  $PD_2$  θα βοηθήσει στην ανίχνευση ισχυρού σήματος.

Ο παλμογράφος ρυθμίζεται στην λειτουργία του dual mode για να μπορεί να απεικονίζει στην οθόνη του τα δυο ανιχνεύσιμα σήματα, το ένα από την  $PD_1$  και το άλλο από την  $PD_2$ , ταυτόχρονα.. Επίσης ο παλμογράφος ρυθμίζεται έτσι ώστε η οριζόντια σάρωση να είναι της τάξης του 1  $\mu s$ .



**Σχήμα 3.6:** Οι εικονιζόμενοι παλμοί από τις φωτοδιόδους  $PD_1$  και  $PD_2$  (χρόνο-καθυστερημένο σήμα)

Στην οθόνη του παλμογράφου (βλέπε σχήμα 3.6) παρατηρούνται οι δυο κυματομορφές μετατοπισμένες όμως χρονικά κατά  $\Delta t$  ( **$\sim 70$  ns**). Η απόσταση που διατρέχει η δέσμη μέχρι το απομακρυσμένο μη περατό κάτοπτρο είναι  $2L$  ( $\sim 22$  m). Η τελευταία θεωρείται στην προκειμένη μέτρηση γνωστή και έτσι η ταχύτητα του φωτός  $c$  μπορεί να υπολογισθεί από τον την γνωστή σχέση

$$c = \frac{Ds}{Dt} = \frac{2L}{Dt} = \frac{21.5m}{70' 10^{-9} \text{ sec}} = 3.07' 10^8 \text{ m/sec} \quad (3.1)$$

Στην σχέση (3.1) το  $2L$  είναι γνωστό και το  $\Delta t$  μετρήθηκε στην οθόνη του παλμογράφου. Η επί της εκατό διαφορά με την πραγματική τιμή της ταχύτητας του φωτός είναι της τάξης των 2.33%.

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι για την χρήση της σχέσης (3.1) θεωρούμε ότι η γωνία ανάκλασης της ακτινοβολίας laser από το μη περατό κάτοπτρο είναι πολύ μικρή για να θεωρηθεί ότι η απόσταση που διένυσε η δέσμη είναι  $2L$  (βλέπε σχήμα 3.1). Επίσης η απόσταση  $l_1$  της φωτοδιόδου  $PD_1$  από το laser είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την  $2L$ .

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις θα πρέπει να τονιστεί ότι η διαφορά δρόμου που ακολουθούν οι δυο δέσμες, η αναφοράς (η οποία ανακλάται από το ημιπερατό κάτοπτρο) και αυτή που διανύει την απόσταση  $2L$ , είναι ίση με  $DL = 2L - l_1$  και έτσι η ταχύτητα του φωτός δίνεται από την σχέση

$$c = \frac{2L - l_1}{t} \quad (3.2)$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η παρούσα πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε επίσης και για την μέτρηση της απόστασης μεταξύ 2 σημείων π.χ. της απόστασης  $2L$  αν η ταχύτητα του φωτός θεωρηθεί γνωστή και ίση με  $3' 10^8$  m / sec.

### 3.6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

Το συγκεκριμένο οπτοηλεκτρονικό σύστημα με την χρήση κάποιων επιπλέον οπτικών εξαρτημάτων μπορεί να αποτελέσει ένα όργανο για την εκτέλεση απλών πειραμάτων φασματοσκοπίας. Π.χ. είναι γνωστό ότι η ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο δίνεται από την σχέση

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.3)$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου μέσα στο οποίο 'ταξιδεύει' το φως. Επομένως ένα η ακτινοβολία laser η οποία κατευθύνεται προς το μη περατό κάτοπτρο δεν ταξιδεύει στο κενό άλλα μέσα από μια οπτική ίνα ή μέσα από ένα δοχείο με νερό κάνοντας χρήση της ίδιας διάταξης μπορούμε μέσω της (3.3) να υπολογίσουμε τον δείκτη διάθλασης του υλικού της ίνας και έτσι να καθορίσουμε το υλικό αυτό.

Επίσης η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εάν θεωρήσουμε ότι το μη περατό κάτοπτρο μπορεί να κινηθεί με μια σταθερή ταχύτητα, και κάνοντας και χρήση του φαινομένου Doppler ως όργανο μέτρησης της ταχύτητας  $v$  ενός αντικειμένου, σύμφωνα με την σχέση

$$f_R = \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} f_s \quad (3.4)$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό,  $v$  είναι η ταχύτητα της πηγής,  $f_R$  είναι η συχνότητα που ανακλάται και  $f_s$  είναι η συχνότητα της φωτεινής πηγής.

### **3.7 Βιβλιογραφία**

1. « Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός με την βοήθεια ενός laser pointer»,  
Δρ. Ιωάννης Α. Σιανούδης, Τμήμα Φυσικής – Χημείας & Τεχνολογίας  
Υλικών, ΣΤΕΦ, ΤΕΙ Αθήνας
2. « Laboratory Measurement of the Velocity of Light», W. Parker etal
3. « Speed of Light Measurement», W.F. Huang
4. « Direct Determination of the Speed of Light as a General Physics  
Laboratory Experiment», J. Cooke etal